

**BİR İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONUNUN  
UÇUŞ DİNAMİKLERİ KISITLARI ALTINDA  
KONUŞLANDIRILMASI**

**DEPLOYMENT OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE  
BASE STATION UNDER FLIGHT DYNAMICS  
CONSTRAINTS**

**MERVE ÇİĞDEM İPEK**

**DOÇ. DR CENK TOKER**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

# ÖZET

## BİR İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONUNUN UÇUŞ DİNAMİKLERİ KISITLARI ALTINDA KONUŞLANDIRILMASI

**Merve Çiğdem İPEK**

**Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cenk TOKER**

**Eylül 2019, 80 sayfa**

Tez kapsamında, 5G ve ötesi haberleşme çalışmalarında önem kazanmış olan İHA Baz İstasyonlarının verimli yerleşimi incelenmektedir. İHA Baz İstasyonlarının araziye verimli yerleşimi acil durumlarda afet bölgelerine doğru şekilde ve hızlı servis vermek veya konser, maç gibi yoğun haberleşme trafiği gerektiren durumlarda sabit haberleşme altyapısına uygun bir şekilde destek vermek açısından önemlidir. Çalışma kapsamında aerodinamik model, hava-yer kanal modellemesi, anten modeli, servis kalitesi ve İHA gücü hesaba katılmaktadır. Tez çalışmasında farklı senaryolar tanımlanarak bu senaryolar kapsamında İHA Baz İstasyonu operasyon süresini eniyileyen bir yerleşim çalışması yapılmaktadır. Bu tez kapsamında, literatürde yer alan İHA Baz İstasyonu yerleşim çalışmalarında göz ardı edilmiş olan İHA aerodinamiği de hesaba katılarak yerleşim çalışmalarının doğruluğu artırılmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** 5G haberleşme, İHA baz istasyonu, hava-yer haberleşmesi, enerji verimli yerleşme, aerodinamik güç

## **ABSTRACT**

# **DEPLOYMENT OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASE STATION UNDER FLIGHT DYNAMICS CONSTRAINTS**

**Merve iğdem İPEK**

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Cenk TOKER**

**September 2019, 80 pages**

Within the scope of this thesis, the efficient placement of UAV Base Stations which have gained importance in 5G and beyond communication studies are examined. The efficient placement of UAV Base Stations in the field is important in order to provide fast and accurate service to disaster areas in case of emergency or to support the fixed communication infrastructure in cases that require heavy communication traffic such as concerts and matches. In the scope of the study, aerodynamic model, air-ground channel modeling, antenna model, service quality and UAV power are taken into account. In the thesis, different scenarios are defined and a placement study that optimizes the operation time of the UAV Base Station is carried out within the scope of these scenarios. Within the scope of this thesis, the accuracy of the settlement studies has been improved by taking into account the UAV aerodynamics which has been ignored in the UAV Base Station settlement studies in the literature.

**Keywords:** 5G communication, UAV base station, air-to-ground communication, energy efficient deployment, aerodynamic power

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Cenk TOKER'e,

Lisans üstü eğitimime destek olan şirketim ASELSAN A.Ş.'ye,

Ve çalışmam sırasında küçük veya büyük yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

Merve Çiğdem İPEK

Eylül 2019, Ankara

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                 |      |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| ABSTRACT .....                                                                  | ii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                                  | iii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                | iv   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                            | vi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                         | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                    | ix   |
| 1. GİRİŞ .....                                                                  | 1    |
| 1.1. 5G ve Ötesi Haberleşme Çalışmaları .....                                   | 1    |
| 1.2. 5G Haberleşmede İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonları.....                  | 5    |
| 1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı .....                                               | 7    |
| 2. LİTERATÜRDE İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYON YERLEŞTİRME<br>ÇALIŞMALARI..... | 12   |
| 3. ÇALIŞMADA KULLANILAN SİSTEM MODELLERİ.....                                   | 23   |
| 3.1. Aerodinamik Model .....                                                    | 23   |
| 3.1.1. Atmosfer Modeli .....                                                    | 23   |
| 3.1.2. İndüklenmiş Güç .....                                                    | 26   |
| 3.1.4. Profil Gücü .....                                                        | 29   |
| 3.1.5. Havada Durma Gücü.....                                                   | 31   |
| 3.2. Kanal Modellemesi .....                                                    | 32   |
| 3.3. Anten Modeli.....                                                          | 36   |
| 3.4. Servis Kalitesi .....                                                      | 36   |
| 3.5. İnsansız Hava Aracı Bataryası .....                                        | 37   |
| 4. İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONU YERLEŞİM SENARYOLARI VE<br>SONUÇLARI.....  | 38   |
| 4.1. Çalışmada Kullanılan Değerler .....                                        | 40   |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2. RF Gönderme Gücü Gz nne Alınarak İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yerleşimi .....                              | 46 |
| 4.2.1. Farklı Çevre Tiplerinin ve İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yüksekliğinin RF Gönderme Gücü zerine Etkisi ..... | 47 |
| 4.2.2. Anten Yarım-Gç Işın Genişliğinin RF Gönderme Gücü zerine Etkisi ....                                           | 52 |
| 4.3. İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Uçuş Dinamiklerinin İncelenmesi .....                                            | 54 |
| 4.3.1. Toplam İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Kütlesi .....                                                           | 55 |
| 4.3.2. Pervane Yarıçapı .....                                                                                           | 58 |
| 4.3.3. İnsansız Hava Aracı Rotor Sayısı .....                                                                           | 60 |
| 4.3.4. Pervane Kanatçık Sayısı .....                                                                                    | 61 |
| 4.3.5. İnsansız Hava Aracı Batarya Sayısı .....                                                                         | 63 |
| 4.4. RF Gönderme Gücü ve Havada Durma Gücü Gz nne Alınarak İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yerleşimi .....         | 64 |
| 4.4.1. RF Gönderme Gücü ve Havada Durma Gücü üzerinde st Sınır Olmama Durumunun İncelenmesi .....                      | 65 |
| 4.4.2. RF Gönderme Gücü üzerinde st Sınır Olma Durumunun İncelenmesi ....                                              | 67 |
| 5. SONUÇ VE YORUMLAR .....                                                                                              | 71 |
| 6. KAYNAKLAR .....                                                                                                      | 75 |
| EKLER .....                                                                                                             | 79 |
| EK 1 - Tezden Türetilmiş Bildiriler .....                                                                               | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                          | 80 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. ITU-R M.2083 Haberleşme Senaryoları ve Haberleşme Parametreleri [1].....                                | 2  |
| Şekil 1.2. IEEE 5G Çalışmaları [3] .....                                                                           | 4  |
| Şekil 1.3. AT&T Mobile ve Intel'in İHA Baz İstasyonu Prototipi [9] .....                                           | 6  |
| Şekil 1.4. Qualcomm'un İHA Baz İstasyonu Prototipi [10] .....                                                      | 6  |
| Şekil 1.5. Ericsson ve China Mobile'in İHA Baz İstasyonu Prototipi [11] .....                                      | 7  |
| Şekil 1.6. Turkcell'in İHA Baz İstasyonu Prototipi [12] .....                                                      | 7  |
| Şekil 1.7. İHA Bİ Yerleşim Problemi .....                                                                          | 8  |
| Şekil 1.8. İHA Bİ Üst Görünüş .....                                                                                | 9  |
| Şekil 2.1. Afet sonrası haberleşme topolojisi [17] .....                                                           | 14 |
| Şekil 2.2. İHA Bİ yüksekliği - kapsama alanı yarıçapı grafiği [19].....                                            | 15 |
| Şekil 2.3 İki İHA Bİ'nin girişim olmayan ortamda optimum yerleşimleri [20] .....                                   | 16 |
| Şekil 2.4. Farklı çevre tiplerinde İHA Bİ'lerin yerleşimleri [22].....                                             | 17 |
| Şekil 2.5. Üç İHA Bİ yerleşimi için çember paketleme teorisinin kullanımı [23].....                                | 18 |
| Şekil 2.6. Kullanıcı yoğunlukları ve İHA Bİ'nin 2 boyutlu yerleşimi [24] .....                                     | 19 |
| Şekil 2.7. Ağ merkezli İHA Bİ yerleşimi [25] .....                                                                 | 20 |
| Şekil 2.8. Kullanıcı merkezli İHA Bİ yerleşimi [25] .....                                                          | 21 |
| Şekil 3.1. Hava Yoğunluğu - Yükseklik Grafiği .....                                                                | 24 |
| Şekil 3.2. Hava Yoğunluğu - Yükseklik Grafiği .....                                                                | 26 |
| Şekil 3.3. İHA'nın Havada Durması .....                                                                            | 26 |
| Şekil 3.4. Pervane uç hızı ile açısal hız arasındaki ilişki.....                                                   | 29 |
| Şekil 3.5. ITU parametrelerine uygun olarak bilgisayarda oluşturulan örnek bir şehir modeli [18].....              | 33 |
| Şekil 3.6. Işın izleme [18] .....                                                                                  | 33 |
| Şekil 4.1. Turkcell Dronecell büyüklüğü [12].....                                                                  | 41 |
| Şekil 4.2. Dronecell Bataryaları [12] .....                                                                        | 42 |
| Şekil 4.3. Gerekli En Küçük RF Gönderme Gücünün Farklı Çevre Tiplerine ve İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi ..... | 48 |
| Şekil 4.4. İHA Bİ Operasyon Süresinin Farklı Çevre Tiplerine ve İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi.....            | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.5. Gerekli En Küçük RF Gönderme Gücünün İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi.....                                                                                                                                                                                     | 53 |
| Şekil 4.6. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi.....                                                                                                                                                                   | 54 |
| Şekil 4.7. Gerekli Havada Durma Gücü – Toplam Kütleye Bağlı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                   | 56 |
| Şekil 4.8. Operasyon Süresi – Toplam Kütleye Bağlı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                            | 57 |
| Şekil 4.9. Gerekli Havada Durma Gücü – Pervane Yarıçapı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                       | 58 |
| Şekil 4.10. Operasyon Süresi – Pervane Yarıçapı Grafiği.....                                                                                                                                                                                                                | 59 |
| Şekil 4.11. Gerekli Havada Durma Gücü – İHA Rotor Sayısı Grafiği.....                                                                                                                                                                                                       | 60 |
| Şekil 4.12. Operasyon Süresi – İHA Rotor Sayısı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                               | 61 |
| Şekil 4.13. Gerekli Havada Durma Gücü – Pervane Kanatçık Sayısı Grafiği.....                                                                                                                                                                                                | 62 |
| Şekil 4.14. Operasyon Süresi – Pervane Kanatçık Sayısı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                        | 62 |
| Şekil 4.15. Havada Durma Gücü – Batarya Sayısı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                                | 63 |
| Şekil 4.16. Operasyon Süresi – Batarya Sayısı Grafiği .....                                                                                                                                                                                                                 | 64 |
| Şekil 4.17. Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi.....                                                                                                                                                                     | 65 |
| Şekil 4.18. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne ve Havada Durma Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi .....                                                                                                                                          | 67 |
| Şekil 4.19. RF Gönderme Gücünün 10 Watt ile Sınırlı Olması Durumunda İHA Bİ'nin Çıkabileceği En Büyük Yükseklikler ve Bu Yüksekliklere Bağlı Olarak Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi.....                             | 68 |
| Şekil 4.20. RF Gönderme Gücünün 10 Watt ile Sınırlı Olması Durumunda İHA Bİ'nin Servis Verebileceği En Büyük Kapsama Alanı Yarıçapı ve Bu Kapsama Alanı Yarıçapına Bağlı Olarak Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi..... | 69 |
| Şekil 4.21. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne ve Havada Durma Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi .....                                                                                                                                          | 70 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Şehirlerin Rakımları ve Hava Yoğunlukları .....                 | 25 |
| Çizelge 3.2. Çevre Tipleri için Parametreler .....                           | 32 |
| Çizelge 3.3. <b>K</b> matrisi [19].....                                      | 34 |
| Çizelge 3.4. <b>L</b> matrisi [19] .....                                     | 35 |
| Çizelge 4.1. İHA Tasarım Değerleri .....                                     | 42 |
| Çizelge 4.2. Çalışmada Kullanılan Haberleşme Değerleri.....                  | 43 |
| Çizelge 4.3. Çalışmada Kullanılan Şehirlerin Rakımları ve Bazı Sabitler..... | 46 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                      |                                                                        |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $A_{er}$             | Alıcı antenin etkin alanı                                              |
| $A_{et}$             | Gönderici antenin etkin alanı                                          |
| $B$                  | Bantgenişliği                                                          |
| $C$                  | Batarya kapasitesi                                                     |
| $c$                  | Işık hızı                                                              |
| $C_{D0}$             | Sürüklenme katsayısı                                                   |
| $c_l$                | Pervane kanatçık genişliği                                             |
| $f$                  | Frekans                                                                |
| $g$                  | Yerçekimi ivmesi                                                       |
| $h_{ank}$            | Ankara rakımı                                                          |
| $h_{erz}$            | Erzurum rakımı                                                         |
| $h_{ist}$            | İstanbul rakımı                                                        |
| $J$                  | Pervane ilerleme oranı                                                 |
| <b>K</b>             | Yol kaybı modelinde kullanılan K matrisi                               |
| $k_{kentsel}$        | Kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı              |
| $k_{kırsal}$         | Kırsal çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı               |
| $k_{yoğun\ kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı        |
| $k_{yüksek\ katlı}$  | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı |
| <b>L</b>             | Yol kaybı modelinde kullanılan L matrisi                               |
| $l_{kentsel}$        | Kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı              |

|                                 |                                                                                                   |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{kırsal}$                    | Kırsal çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı                                          |
| $l_{yoğun\ kentsel}$            | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı                                   |
| $l_{yüksek\ katlı}$             | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı                            |
| $m_{bat}$                       | Batarya kütlesi                                                                                   |
| $m_{bi}$                        | Baz istasyonu kütlesi                                                                             |
| $m_{İHA}$                       | İHA kütlesi                                                                                       |
| $N_0$                           | Gürültü izgel yoğunluğu                                                                           |
| $N_{bat}$                       | Batarya sayısı                                                                                    |
| $N_{kanatçık}$                  | Pervane kanatçık sayısı                                                                           |
| $N_{rotor}$                     | İHA rotor sayısı                                                                                  |
| $P_{cir}$                       | Devre gücü                                                                                        |
| $R$                             | Pervane yarıçapı                                                                                  |
| $T_{tek}$                       | Tek bir rotorun oluşturduğu itki                                                                  |
| $T_{toplam}$                    | Tüm rotorların oluşturduğu toplam itki                                                            |
| $u_0$                           | Hava yoğunluğu formülünde kullanılan sabit                                                        |
| $V$                             | Batarya gerilimi                                                                                  |
| $\gamma_{min}$                  | En küçük sinyal-gürültü oranı                                                                     |
| $\eta_{LoS,dB}$                 | Görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)                                          |
| $\eta_{LoS,dB,kentsel}$         | Kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)       |
| $\eta_{LoS,dB,kırsal}$          | Kırsal çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)        |
| $\eta_{LoS,dB, yoğun\ kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden) |

|                                 |                                                                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\eta_{LoS,dB,yüksek\ katlı}$   | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)         |
| $\eta_{NLoS,dB}$                | Görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)                                                 |
| $\eta_{NLoS,dB,kentsel}$        | Kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)              |
| $\eta_{NLoS,dB,kırsal}$         | Kırsal çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)               |
| $\eta_{NLoS,dB,yoğun\ kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden)        |
| $\eta_{NLoS,dB,yüksek\ katlı}$  | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (desibel cinsinden) |
| $\theta_B$                      | Yarım-güç ışın genişliği                                                                                         |
| $v_{uç}$                        | Pervanenin uç noktasının hızı                                                                                    |
| $\rho_0$                        | Deniz seviyesindeki hava yoğunluğu                                                                               |

## Kısaltmalar

|      |                                                                                       |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1G   | 1. Generation (1. Nesil)                                                              |
| 3GPP | The 3rd Generation Partnership Project (Üçüncü Nesil Mobil İletişim Ortaklık Projesi) |
| 4G   | 4. Generation (4. Nesil)                                                              |
| 5G   | 5. Generation (5. Nesil)                                                              |
| AEN  | Ağ Erişim Noktası                                                                     |
| AR   | Augmented Reality (Artırılmış Gerçeklik)                                              |
| Bİ   | Baz İstasyonu                                                                         |
| BTK  | Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Başkanlığı                                     |

|      |                                                                                                       |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| eMBB | Enhanced Mobile Broadband (Gelişmiş Mobil Geniş Bant)                                                 |
| ETSI | European Telecommunications Standard Institute (Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi)         |
| Gbps | Gigabits per second (saniyedeki Gigabit sayısı)                                                       |
| IEEE | The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) |
| IETF | Internet Engineering Task Force (İnternet Mühendisliği Görev Grubu)                                   |
| IoT  | Internet of Things (Nesnelerin İnterneti)                                                             |
| IP   | Internet Protocol (İnternet Protokolü)                                                                |
| ITU  | International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)                         |
| İHA  | İnsansız Hava Aracı                                                                                   |
| kg   | kilogram                                                                                              |
| KSA  | Kablosuz Sensör Ağları                                                                                |
| m    | Metre                                                                                                 |
| MEC  | Multi-access Edge Computing (Çoklu Sınır Bilişim)                                                     |
| MHz  | Megahertz                                                                                             |
| mMTC | Massive Machine-type Communications (Masif Nesnelerin İnterneti)                                      |
| mWT  | Millimeter Wave Transmission (Milimetre Dalga Haberleşmesi)                                           |
| NFV  | Network Functions Virtualization (Ağ Fonksiyon Sanallaştırması)                                       |
| NGP  | Next Generation Protocols (Gelecek Nesil Protokolleri)                                                |
| RF   | Radio Frequency (Radyo Frekansı)                                                                      |
| RFC  | Request for Comments (Yorumlar için Talep)                                                            |

|         |                                                                                  |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------|
| SGO     | Sinyal-Gürültü Oranı                                                             |
| SoftRAN | Software Defined Radio Access (Yazılım Tabanlı Radyo Erişim Ağı)                 |
| URLLC   | Ultra-Reliable and Low Latency Communications (Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikme) |
| V2X     | Vehicle-to-Everything (Akıllı Hareketlilik)                                      |
| vb.     | ve benzeri                                                                       |
| Wi-Fi   | Wireless Fidelity (Kablosuz Bağlantı Alanı)                                      |
| WLAN    | Wireless Local Area Network (Kablosuz Yerel Alan Ağı)                            |



# 1. GİRİŞ

## 1.1. 5G ve Ötesi Haberleşme Çalışmaları

Mobil kablosuz haberleşme ağ teknolojileri, 1980’li yılların başlarında kullanıma başlanmış olan 1G teknolojisinden bu yana hızla gelişmektedir. Bu gelişmelerin nedeni olarak; daha fazla haberleşme servisi sunmak, daha yüksek veri hızı ve kapasite sağlamak, daha geniş kapsama alanı oluşturmak, haberleşme gecikmesini azaltmak ve benzeri gereksinimler sayılabilir. Bu amaçla frekans bandının verimli kullanımı, modülasyonlar, kodlama teknikleri, protokoller, çoklu erişim teknikleri, alıcı verici devre tasarımları, anten tasarımları vb. üzerinde çalışılarak mobil haberleşme alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir.

Dünyada pek çok kuruluş, 5G ve ötesi haberleşmenin standartlarının belirlenmesi için aktif olarak çalışmaktadır. Bu alanda çalışan önemli kuruluşlar arasında aşağıdakiler bulunmaktadır:

- Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union – ITU)
- Üçüncü Nesil Mobil İletişim Ortaklık Projesi (The 3rd Generation Partnership Project – 3GPP)
- Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE)
- İnternet Mühendisliği Görev Grubu (Internet Engineering Task Force – IETF)
- Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (European Telecommunications Standard Institute – ETSI)

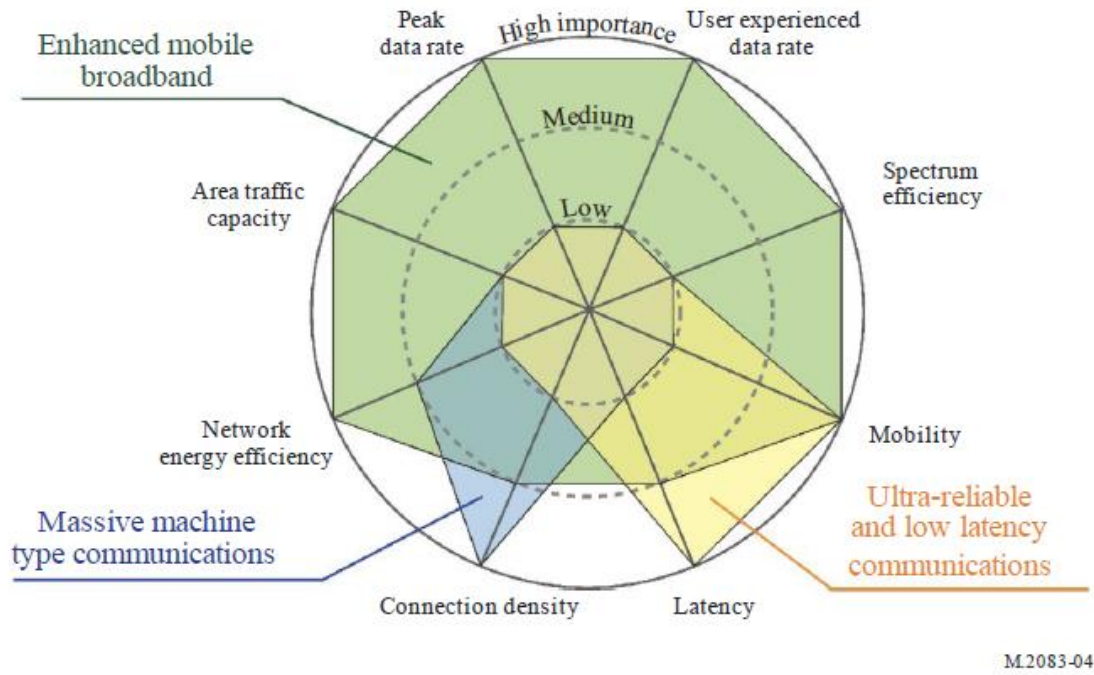
Ülkemizde ise Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Başkanlığı (BTK), 5G haberleşme alanında telekomünikasyon şirketleri ve üniversiteler ile iş birliği yaparak çalışmalar yürütmektedir.

5G standardı için ITU tarafından ITU-R M.2083 çalışmasında aşağıdaki kullanım senaryoları belirlenmiştir [1]:



- Gelişmiş Mobil Geniş Bant (Enhanced Mobile Broadband – eMBB)
  - İnsanların kullanımı için
  - Yüksek veri hızları, yüksek kullanıcı yoğunluğu, yüksek trafik kapasitesi
- Masif Nesnelerin İnterneti (Massive Machine-type Communications – mMTC)
  - Nesnelerin interneti için
  - Bağlantı yoğunluğu, düşük güç kullanımı
- Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikme (Ultra-Reliable and Low Latency Communications – URLLC)
  - Güvenliğin, gecikmenin ve veri hızlarının kritik uygulamalar için (örnek: endüstri üretiminin uzaktan kontrolü, tıbbi ameliyatların makineler ile yapılması, ulaşım güvenliği vb.)
  - Yüksek veri hızı, düşük gecikme

Bu senaryolar için belirlenen haberleşme hedefleri Şekil 1.1’de gösterilmektedir [1]:



Şekil 1.1. ITU-R M.2083 Haberleşme Senaryoları ve Haberleşme Parametreleri [1]

Görselde, haberleşme hedefleri 8 parametre ile gösterilmektedir:

- Ağ enerji verimliliği (network energy efficiency)

- Alan trafik kapasitesi (area traffic capacity)
- Tepe veri hızı (peak data rate)
- Kullanıcının deneyimlediği veri hızı (user experienced data rate)
- Spektrum verimliliği (spectrum efficiency)
- Hareketlilik (mobility)
- Gecikme (latency)
- Bağlantı yoğunluğu (connection density)

Görselin merkez noktasından kenarlara doğru ilerlendikçe ilgili özelliğin önemi artmaktadır. Şekilde 3 ayrı dairenin en küçüğü düşük önemi, orta büyüklükte olanı orta derecede önemi ve en büyüğü yüksek önemi göstermektedir. ITU standart çalışmasının bahsettiği eMBB yeşil renk ile, mMTC mavi renk ile ve URLLC ise sarı renk ile gösterilmektedir. Buradan eMBB'nin hedefinin yüksek ağ enerji verimliliği, alan trafik kapasitesi, tepe veri hızı, kullanıcının deneyimlediği veri hızı, spektrum verimliliği ve hareketlilik ile orta seviyede gecikme ve bağlantı yoğunluğu olduğu görülmektedir. mMTC'nin hedefi ise yüksek bağlantı yoğunluğu ve orta seviyede ağ enerji verimliliğidir. URLLC'nin hedefi ise en az miktarda gecikme ve yüksek mobilite olarak gösterilmektedir.

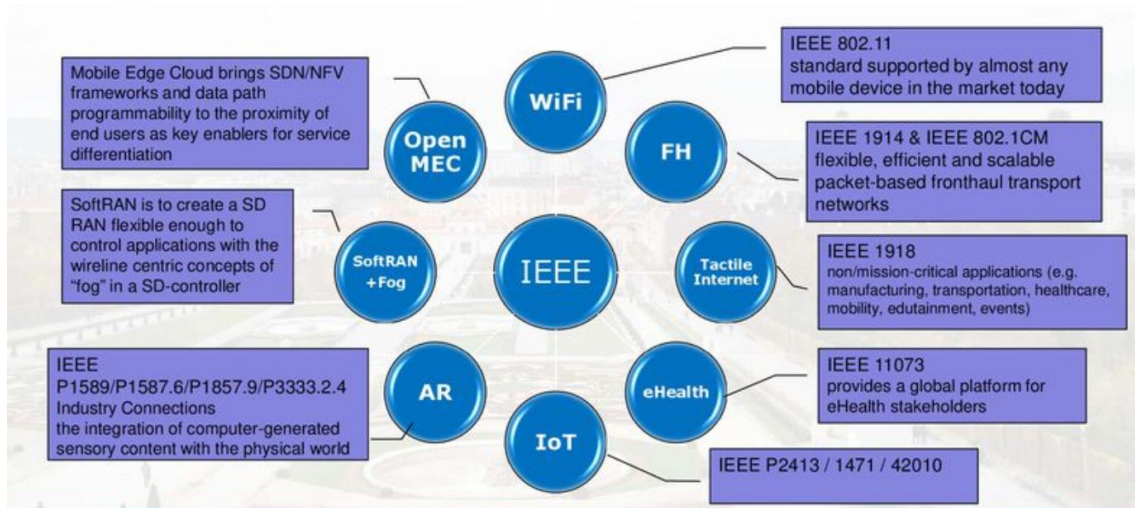
Bu hedefler çerçevesinde 5G ve ötesi haberleşme için kullanılacak frekanslar, bantgenişlikleri, modülasyon türleri, ağ mimarileri vb. üzerine çalışmalar yürütülmektedir.

5G standardizasyon çalışmalarında önemli yere sahip olan 3GPP, 5G için ilk standartların yer aldığı TR21.915 Release 15 isimli çalışmayı [2] 2018 yılında yayınlamıştır. Bu çalışmanın içeriği aşağıda verilmektedir:

- 5G Sistemi – Faz 1
- Makine Haberleşmesi ve Nesnelerin İnterneti
- Akıllı Hareketlilik (Vehicle-to-Everything, V2X)
- Görev-kritik iyileştirmeleri

- WLAN ve lisanslanmamış spektrum
- Sistem iyileştirmeleri
- LTE iyileştirmeleri

IEEE'nin, 5G haberleşmede çalışma yürüttüğü konular Şekil 1.2'de verilmektedir [3]:



Şekil 1.2. IEEE 5G Çalışmaları [3]

- Kablosuz Bağlantı Alanı (Wireless Fidelity, Wi-Fi)
- Fronthaul, FH
- Dokunsal İnternet (Tactile Internet)
- e-Sağlık (e-Health)
- Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT)
- Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality, AR)
- Yazılım Tabanlı Radyo Erişim Ağı + Sis (Software Defined Radio Access Network, SoftRAN + Fog)
- Açık Çoklu Sınır Bilişim (Open Multi-access Edge Computing, MEC)

IETF aşağıdaki çalışma alanlarında RFC'ler hazırlamaktadır [4]:

- İnternet: paketler, paket adresleme, hareketlilik
- Yönlendirme: Paketler için yol seçme
- Ağların işletim ve yönetimi

- Uygulama protokolleri
- Güvenlik protokolleri

Bu alanlarda yapılan yeni çalışmaların 5G ile entegre çalışması beklenmektedir.

Son olarak ETSI'nin 5G çalışmaları arasında Ağ Fonksiyon Sanallaştırması (Network Functions Virtualization, NFV), Çoklu Sınır Bilişim (Multi-access Edge Computing, MEC), Milimetre Dalga Haberleşmesi (Millimeter Wave Transmission, mWT) ve Gelecek Nesil Protokolleri (Next Generation Protocols, NGP) sayılabilir [5].

### **1.2. 5G Haberleşmede İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonları**

İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonları (İHA Bİ), afet durumlarında altyapıları zarar görmüş bölgelerin acil haberleşme ihtiyaçlarını sağlamak amacıyla kullanılabilecekleri gibi, konser, maç vb. aktivitelerde oluşan yüksek veri trafiğini rahatlatmak amacıyla da kullanılabilirler [6, 7, 8]. 5G ağ mimarisi çalışmaları içinde İHA Bİ kullanımı önemli bir yer kaplamaktadır. 5G haberleşmede İHA Bİ, Sabit Baz İstasyonları (SBİ) ile kullanıcı arasında bağlantıyı röle şeklinde ileten yapılar olabilecekleri gibi, yönlendirme, rotalama vb. işlemleri gerçekleştirebilen baz istasyonları da olabilirler.

İlk İHA Bİ çalışmaları 2016 yılının Şubat ayında AT&T Mobile ve Intel firmalarının ortak çalışmaları ile 4G haberleşme altyapısında denenmiştir [9]. Bu denemenin ardından 2016 yılının Eylül ayında Qualcomm [10] ve 2016 yılının Ekim ayında Ericsson ve China Mobile [11] firmaları da benzer testler yapmıştır. Ülkemizde ise Turkcell 2018 yılında Dronecell uçuş denemelerini başarı ile gerçekleştirmiştir [12]. Bu çalışmalarda kullanılan İHA Bİ görselleri sırası ile Şekil 1.3, 1.4, 1.5 ve 1.6'da verilmektedir [9, 10, 11, 12].



Şekil 1.3. AT&T Mobile ve Intel'in İHA Baz İstasyonu Prototipi [9]



Şekil 1.4. Qualcomm'un İHA Baz İstasyonu Prototipi [10]



Şekil 1.5. Ericsson ve China Mobile’ın İHA Baz İstasyonu Prototipi [11]



Şekil 1.6. Turkcell’in İHA Baz İstasyonu Prototipi [12]

Firmalar İHA Bİ tasarımları yaparken bunların arazide verimli şekilde konuşlandırılması akademide ilgi çekici bir problem olmuştur. Bu tez çalışmasında İHA Bİ yerleşim çalışması incelenmektedir.

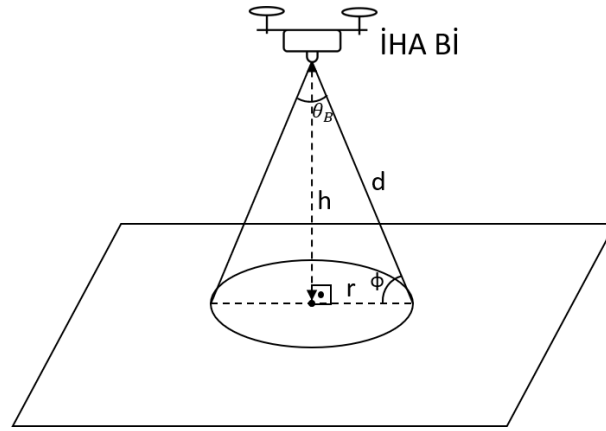
### 1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tezin amacı İHA Bİ’nin verimli yerleşimidir. İHA’ların verimli yerleşimi konusu; İHA’nın daha geniş bir kapsama alanına hizmet vermesi şeklinde yorumlanabileceği gibi,



batarya kapasitesi kısıtı nedeni ile çalışma süresi kısa olan İHA'ların daha uzun süre çalışmalarını sağlayacak şekilde yerleşimi olarak da düşünülebilir. Bu tez çalışmasında ikinci yaklaşım benimsenmiştir. Yani İHA Bİ operasyon süresini maksimize eden yerleşimin bulunması hedeflenmektedir.

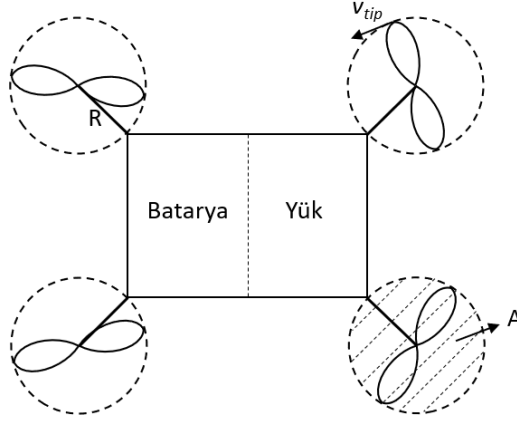
Şekil 1.7'de İHA Bİ'nin kapsama alanı gösterilmektedir. İHA Bİ'nin kapsama alanı, bulundukları yüksekliğe, gönderme güçlerine, kullanılan antenin örüntü yapısı gibi faktörlere göre değişebilmektedir.



Şekil 1.7. İHA Bİ Yerleşim Problemi

Şekilde İHA Bİ, yerden  $h$  yükseklikte olup, antenlerin sahip olduğu yarım-güç ışın genişliği  $\theta_B$  kadardır. Kapsama alanının yarıçapı  $r$ , İHA Bİ'nin kapsama alanının kenar noktasına olan uzaklığı ise  $d$  ile gösterilmektedir.  $r$ ,  $h$  ve  $d$  arasında dik üçgenden gelen basit bir geometrik ilişki bulunmaktadır.

Tez çalışmasında, İHA olarak döner kanatlı düşük yükseklikteki platformlar referans alınmıştır. Örnek bir İHA Bİ'nin üstten görünüşü Şekil 1.8'de verilmektedir.



Şekil 1.8. İHA Bİ Üst Görünüş

Bu şekilde gösterilen İHA Bİ, dört adet rotora sahiptir ve her bir rotorun pervanesi iki adet kanatçık içermektedir. Bu pervaneler, İHA'nın kendi ağırlığını taşımanın yanı sıra, İHA'nın üstünde yer alan batarya ve baz istasyonu yüklerini de taşımaktadır. Döner kanatlı düşük yükseklik İHA'larının boyutları diğer uçan platformlara göre daha küçük olduğu için taşıyabilecekleri batarya miktarı sınırlıdır ve bu bataryanın sağlayacağı enerji de çok fazla olamamaktadır. Güç tüketimine bağlı olarak İHA'nın havada kalma süresi birkaç dakikadan 40-50 dakika civarlarına kadar değişebilmektedir. Bu çalışmada İHA güç tüketimi olarak aerodinamik güçler, verici RF gönderme gücü ve devre gücü hesaba katılmıştır.

Aerodinamik güç; hava yoğunluğu gibi dış etmenlere ve kütle, pervane sayısı, yarıçapı, kanat profili gibi İHA fiziksel özelliklerine bağlıdır. İHA'ların havada kalmak için harcadıkları aerodinamik güç; gönderme ve devre güçlerine kıyasla daha yüksek olduğu için operasyon süresi üzerinde çok daha fazla etkili olmaktadır.

Gönderme gücü hesabında ise kapsama alanının en kenarında bulunan kullanıcıya bile sinyal-gürültü oranı eşiğinin üstünde yayın ulaştırılması hedeflenmiştir. İlgili sinyal-gürültü oranını sağlayacak olan gönderme gücünün hesaplanabilmesi için bağ bütçe hesabından yararlanılmış ve kullanılan frekansa uygun hava-yer kanal modellemesi, anten modellemesi ve servis kalitesi modellerinden yararlanılmıştır.



Bu tez çalışmasında birbiri ile ilişkili üç yerleşim senaryosu oluşturulmuştur. Bunlardan ilki; İHA'nın aerodinamik gücünün yükseklikten bağımsız olarak sabit sayıldığı, kapsama alanının en kenarındaki kullanıcılar için minimum sinyal-gürültü oranının sağlandığı ve İHA Bİ operasyon süresinin maksimize edildiği yerleşim çalışmasıdır. Bu ilk çalışmada amaç sadece elektronik haberleşme parametrelerinin kullanıldığı bir problem formülasyonu oluşturmak ve bu parametrelerin incelenmesidir.

İkinci senaryoda İHA Bİ'nin uçuş dinamikleri ve bunların operasyon süresine etkileri incelenmiştir.

Son olarak üçüncü senaryoda ise İHA Bİ'nin hem aerodinamik gücü hesaba katılmış, hem de kullanıcılara minimum sinyal-gürültü seviyesini sağlayan bir yerleşim çalışması yapılmıştır. Bu son senaryo ilk iki senaryoyu da kapsamaktadır ve en gerçekçi senaryodur.

Bu tez çalışmasında tek İHA Bİ'nin yükseklik boyutundaki yerleşimi incelenmiştir. Birden çok İHA Bİ kullanılması durumunda İHA Bİ'lerin kapsama alanları arasındaki girişim, kullanıcı - baz istasyonu eşleşmesi için uygun modülasyon ve çoklu erişim tekniklerinin hesaba katılması, İHA Bİ'ler arası omurga haberleşmesinin sağlanabilmesi için gerekli kısıtların ilave edilmesi, vb. gerekmektedir. Ayrıca kullanıcı yoğunluğunun eşit dağılımlı olmadığı durumlar incelenmek istenirse İHA Bİ'lerin kapasitelerine göre servis sağlayabilecekleri maksimum kullanıcı sayısını da hesaba katarak hücreler oluşturmak ve yerleşimde bunu da hesaba katmak gereklidir. Bu bahsedilen çalışmalar bu tezin konusu dışında olup ileride yapılabilecek çalışmalar olarak değerlendirilmektedir.

Tez şu bölümlerden oluşmaktadır: İkinci bölüm literatürde yer alan İHA Bİ yerleşim çalışmalarını özetlemekte ve şu anda literatürün bu konuda bulunduğu konumu göstermektedir. Üçüncü bölüm İHA Bİ yerleşim çalışmasında kullanılan aerodinamik modelleri ve haberleşmeye yönelik olarak kullanılan yol kaybı, anten, SGO (Sinyal-

Gürültü Oranı) modellerini açıklamaktadır. Dördüncü bölümde problem formüle edilmiş ve sayısal matematik programları ile yapılan analizlerin sonuçları değerlendirilmiştir. Beşinci bölümde tez çalışmasının sonuçları ve bu bağlamda ileride ne gibi çalışmalara devam edilmesi gerektiği yönünde yorumlar bulunmaktadır.

## 2. LİTERATÜRDE İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYON YERLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Literatürde 4G ve 5G haberleşmede İHA Bİ kullanımı ve yerleşimi ile ilgili çalışmalar 10 yıldan fazla süredir yer almakla beraber, 2014'ten beri yoğunluk kazanmıştır. Bu başlık altında bu konuda literatürde en çok iz bırakan çalışmalar incelenmektedir. İHA Bİ hareketli olduğu için istediği alana konuşlanabilir, yerleşim yerini kısa sürede değiştirebilir ve yerleşimi üç boyutludur; sabit baz istasyonları ise sabit oldukları için önceden çalışılmış belirli lokasyonlara kurulurlar, genellikle uzun vadeli ve kalıcı bir yerleşim planlaması yapılır ve yerleşimleri iki boyutludur [13]. Ayrıca İHA Bİ'lerde sınırlı batarya kapasitesi nedeniyle havada durma ve uçuş süreleri kısıtları yer alırken sabit baz istasyonlarında zaman kısıtlaması bulunmamaktadır [13].

2006 yılında Zhan, Yu ve Swindlehurst'un yaptığı çalışmada İHA'ların, sabit baz istasyonları ile Ağ Erişim Noktaları (AEN) arasında tepe veya yüksek binalar gibi engeller olması durumunda veya sabit baz istasyonunun kapsama alanını genişletme amacıyla röle olarak kullanıldığı durum incelenmektedir [6]. Çalışmada İHA'ların duruş açıları değiştirilerek hava-yer haberleşme bağ performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bunun için İHA ve AEN'lerin birden çok antene sahip olduğu, AEN sayısının çok fazla olmadığı, AEN'lerin kullandığı frekansların dikgen olduğu ve girişim olmadığı ve İHA'nın bantgenişliğinin yeterli olduğu varsayılmıştır. Çalışmada kanal modellemesi, adaptif modülasyon ve uzay-zaman kodlaması kullanılarak her bir İHA-AEN bağı için ortalama veri hızları ve bit hata oranları hesaplanmış ve bu bağların belli bir servis kalitesini sağlaması için İHA'nın yönünün değiştirilmesi, İHA-AEN bağ atamaları yapılması, gerekmesi durumunda sisteme daha çok İHA çağırılması çözümleri çalışılmıştır.

2010 yılında Freitas ve arkadaşlarının çalışmasında [14], Kablosuz Sensör Ağları'nda (KSA) yaşanan sensör ile sabit baz istasyonu arasındaki haberleşme bağı kopması/kurmaması problemine çözüm olarak, haberleşme ağının güvenilirliğini artırmak amacıyla İHA'ların röle olarak kullanımı çalışılmıştır. Çalışmada, bu amaçla İHA rölelerinin kendi aralarında kurduğu ağın sürekliliğinin sağlanması incelenmiştir. İHA'ların x-y düzleminde rastgele hareketlilikleri sonrası, İHA'lar arası sinyal seviyeleri

hesaplanıp kaydedilerek, İHA'ların haberleşme ağının kuvvetleneceği yönde hareket etmeleri sağlanmıştır.

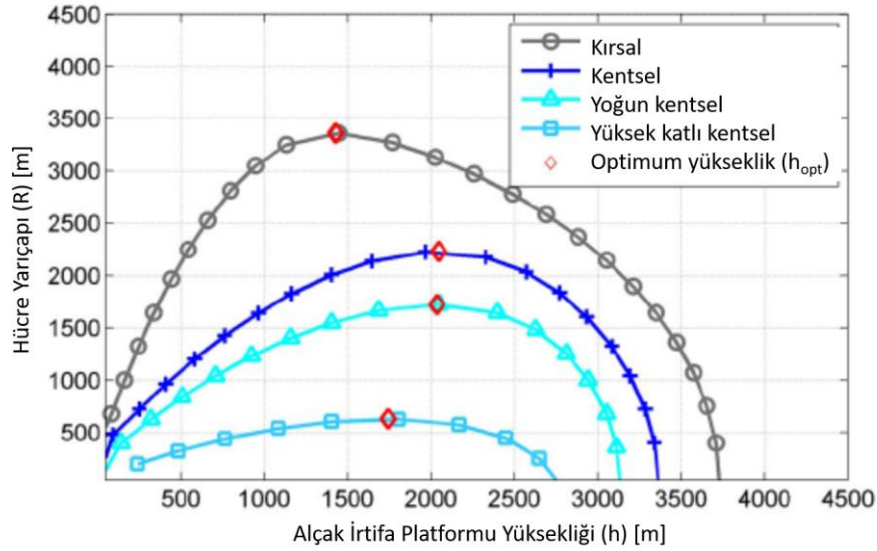
2011 yılında Daniel ve Wietfeld yaptıkları çalışmada [15], volkan patlaması, büyük yangınlar, endüstriyel olaylar veya terörist saldırıları gibi önemli olaylarda tehlikeli alanlarına gönderilecek olan İHA'ların sensörleri vasıtası ile keşif ve gözetim işlerinin yapılması ve buralardan alınan verilerin yine İHA'larla kurulacak olan haberleşme ağları üzerinden sabit baz istasyonlarına getirilmesi problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla, İHA'lar arası ve İHA – sabit baz istasyonları arası kullanılacak haberleşme frekansları, protokolleri vb. hesaba katılarak ilgili haberleşme altyapısında alıcı sinyal gücüne bakılarak sürü optimizasyon algoritmaları ile İHA'ların iki boyutlu yerleşimleri çalışılmıştır.

2012 yılında Rohde ve Wietfeld 4G kablosuz haberleşme ağında, hücrelerde anlık yoğunluklar yaşanması veya kapsama alanının yetersiz kalması durumlarında İHA'ların röle olarak bu alanlara servis vermesine yönelik olarak çalışmıştır [16]. Gerekli İHA sayısı, bu İHA'ların hücrelere yerleşimi, hücreler için frekans planlaması, İHA'ların RF gönderme gücü üzerinde durulmuştur.

2014 yılında Kosmerl ve Vilhar yaptıkları çalışmada, bir arazide afet meydana geldiğinde harita üzerinde haberleşme altyapısı zarar görmüş olan hücreleri belirleyerek bu hücrelere servis verebilmek için İHA Bİ'lerin nasıl yerleştirilecekleri üzerinde durmuşlardır [17]. Bunun için arazi haritasını kare hücrelere bölmüşler ve zarar görmüş olan lokasyonları Şekil 2.1'de verildiği şekilde işaretlemişlerdir [17].



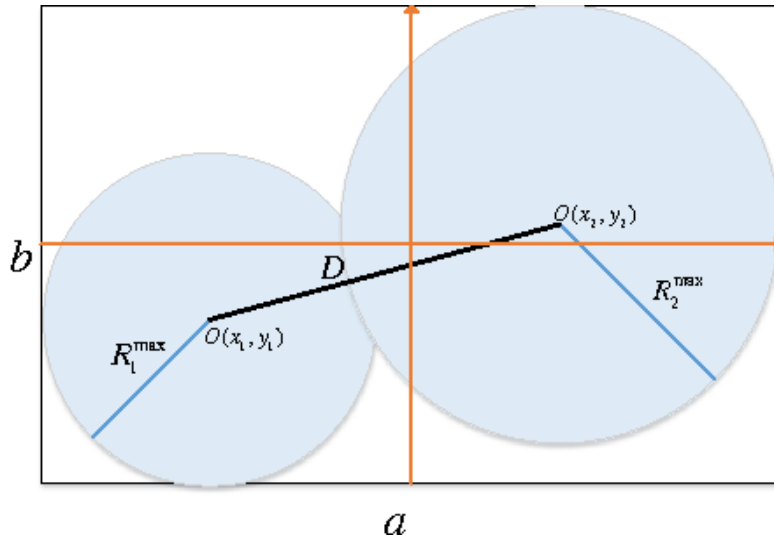
Al-Hourani, Kandeepan ve Lardner, aynı yıl içinde [18] numaralı çalışmada sundukları kanal modelini kullanarak optimum İHA Bİ yüksekliğini çalışmışlardır [19]. Bu çalışmada; alıcılar, dört farklı şehir tipinde düzenli olarak dağıtılmışlardır. Bir İHA Bİ'nin farklı yükseklikler için kapsama alanı değişmekte ve bu alan içindeki alıcılar ile gönderici arasındaki RF yol kaybı da değişmektedir. Çalışmada kapsama alanı içindeki alıcılar için ortalama RF yol kaybına bir üst eşik değer konularak, İHA Bİ yüksekliğine bağlı olarak bu eşik değerinin altında kalan alan İHA Bİ'nin kapsama alanı kabul edilmiştir. Çalışmada İHA Bİ yüksekliğine karşılık gelen kapsama alanları değerlendirilerek bu alanı maksimize eden İHA Bİ yükseklikleri bulunmuştur. RF yol kaybı üst eşik değeri 10 dB ve frekans 2 MHz kabul edildiği çalışmada elde edilen İHA Bİ yüksekliği – kapsama alanı yarıçapı grafiği Şekil 2.2'de verilmektedir [19].



Şekil 2.2. İHA Bİ yüksekliği - kapsama alanı yarıçapı grafiği [19]

Şekilde görüleceği üzere İHA Bİ yüksekliği arttıkça ilk başta kapsama alanı artmaktadır. Bunun nedeni yükseklik arttıkça, göndericinin daha çok alıcı ile doğrudan görüş hattı kurabilmesidir. Ancak yükseklik artmaya devam ederken belirli noktalardan sonra kapsama alanı küçülmeye başlamaktadır. Bunun da nedeni serbest uzay yol kaybının artmasıdır. Bu kırılmanın yaşandığı yükseklikler optimal yükseklikler olarak belirlenmiştir.

2015 yılında Mozaffari, Saad, Bennis ve Debbah, Hourani'nin [19] numaralı çalışmasını bir adım öteye taşımışlardır [20]. Çalışmalarının ilk kısmında Hourani'nin RF yol kaybı modelini kullanarak, alıcılar için Sinyal-Gürültü Oranı (SGO) hesaplamışlar ve buna uygun olarak optimum İHA Bİ yüksekliğini belirlemişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında ise girişim olmayan bir ortamda iki İHA Bİ yerleşimi çalışılmıştır. Burada kullanıcı yoğunluğu gibi detaylara girilmeden, İHA Bİ'lerin optimum yükseklikleri hesaplanarak bu yüksekliklere uygun kapsama alanı yarıçap değerleri belirlenmiş ve ilgili dikdörtgen alanın uzak taraflarına yerleştirilmeye çalışılmıştır. Buna yönelik yerleşim çizimi Şekil 2.3'te verilmiştir [20].



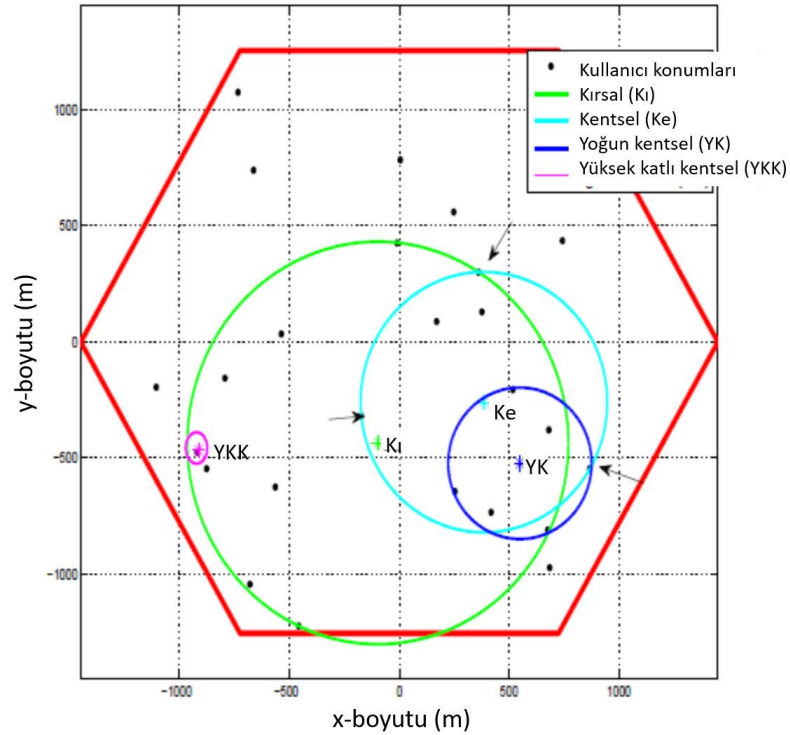
Şekil 2.3 İki İHA Bİ'nin girişim olmayan ortamda optimum yerleşimleri [20]

Aynı çalışmanın üçüncü kısmında ise girişim olduğu ortamda iki İHA Bİ'nin yerleşimi çalışılmıştır. Bunun için de kullanıcılar için eşik bir Sinyal-Girişim Artı Gürültü Oranı seviyesi tanımlanmış, bu seviyeyi geçmeyecek şekilde yerleşim çalışılmıştır.

Hayajneh, Zaidi, McLernon ve Ghogho'nun 2016 yılındaki çalışmasında, afet sonrası İHA Bİ yerleşimi üzerine çalışılmıştır [21]. Alanda mikro baz istasyonları olduğu ve afet sonrası bunların bir kısmının işlevini yitirdiği, destek amaçlı alana  $N_D$  sayıda İHA Bİ getirildiği ve bunların arazide çalışmaya devam eden mikro baz istasyonları ile birlikte haberleşmeyi sürdürdüğü senaryo üzerinde durulmuştur. Alandaki mikro baz istasyonlarının homojen olmayan Poisson nokta sürecine göre, İHA Bİ'lerin ise binom nokta sürecine göre yerleştirildiği varsayılmıştır. Ardından Hourani'nin RF yol kaybı

modeli, Rayleigh sönümlenmesi hesaba katılarak sadece İHA Bİ'lerin olduğu durum ve mikro baz istasyonları ve İHA Bİ'lerin beraber çalıştığı durum için kapsama oranları incelenmiştir. İki sistemin beraber çalışması durumunda performansın arttığı görülmüştür.

Bor Yalınız, El-Keyi ve Yanıkömeroğlu, [22] numaralı çalışmada bir adet İHA Bİ'nin 3 boyutlu yerleşimi üzerinde durmuşlardır. [18] numarada verilmiş olan RF yol kaybı modeli kullanılarak, yerde rastgele dağıtılmış olan kullanıcıların SGO'ları hesaplanmış ve belli bir servis kalitesinin üstünde olan kullanıcılar İHA Bİ'nin servisinden faydalaniyor, eşik değerin altında kalanlar ise İHA Bİ'den servis alamıyor olarak kabul edilmiştir. Çalışmada İHA Bİ'nin servis verdiği kullanıcı sayısı maksimize edilmeye çalışılmıştır. Bu optimizasyon problemine İHA Bİ'nin yüksekliği ve x-y pozisyonları için de sınırlar tanımlamıştır. Kullanıcı sayısı tamsayı olduğu için, problem karesel-kısıtlı karışık doğrusal-olmayan optimizasyon problemine dönüşmüştür. Çalışma sonucunda, farklı çevreler için (kırsal, kentsel, yoğun kentsel, yüksek katlı kentsel) hava-yer kanal modellemesi farklı olduğundan Şekil 2.4'te verildiği üzere farklı yerleşim sonuçları bulunmuştur [22].

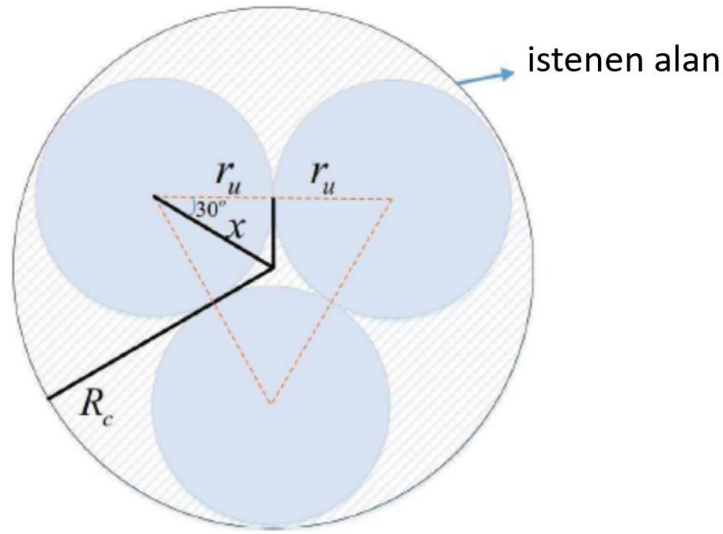


Şekil 2.4. Farklı çevre tiplerinde İHA Bİ'lerin yerleşimleri [22]



Şekilde kapsama alanının dar olması İHA Bİ'nin yüksekliğinin az olduğunu göstermektedir. Hava-yer kanal kaybı arttıkça İHA Bİ'ler kullanıcılara eşik servis kalitesini sağlayabilmek için daha küçük bir alana servis vermek zorunda kalmaktadırlar. Bu nedenle en küçük kapsama alanı yüksek katlı kentsel çevre tipine aitken, en yüksek kapsama alanı kırsal çevre tipine ait bulunmuştur.

Mozaffari, Saad, Bennis ve Debbah [23] numaralı çalışmalarında dairesel bir alanda çok sayıda İHA Bİ'nin yerleşimi üzerine çalışmışlardır. Bunun için [18] numaralı çalışmadaki RF yol kaybı modelini ve ayrıca yönlü antenin kazancını hesaba katarak İHA Bİ için kapsama olasılığı çıkarmışlardır. Ardından ilgili alana bu İHA Bİ'leri yerleştirmek için çember paketleme teorisinden faydalanılmıştır. Çalışmada bulunan örnek bir sonuç Şekil 2.5'te paylaşılmaktadır [23].

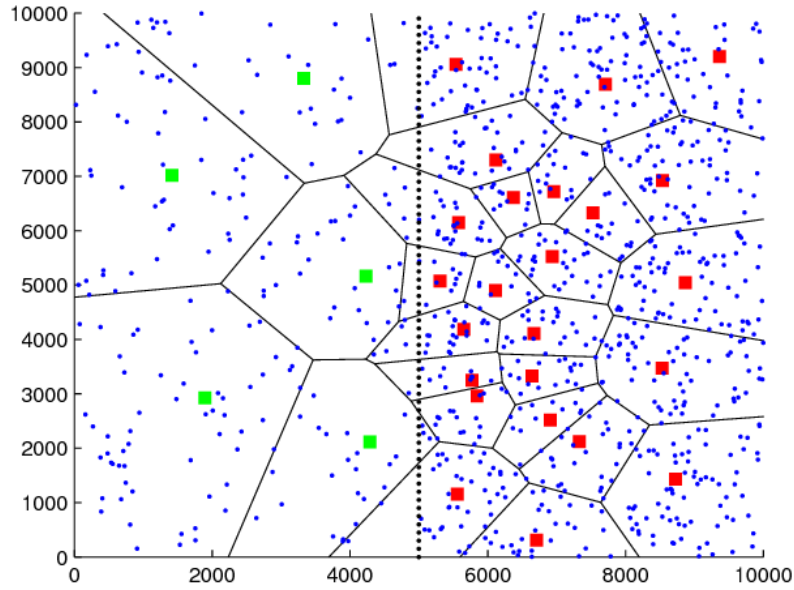


Şekil 2.5. Üç İHA Bİ yerleşimi için çember paketleme teorisinin kullanımı [23]

Çalışmanın sonucu olarak pek çok İHA yerleşiminde, İHA Bİ sayısı, bunların anten kazançları ve ışın genişliklerinin önemli olduğu belirtilmiştir [23].

Kalantari, Yanıkömeroğlu ve Yongacoğlu, [24] numaralı çalışmada, farklı kullanıcı yoğunluğu dağılımına sahip bir alanda İHA Bİ'lerin metasezgisel algoritmalar ile

yerleşimi üzerinde durmuştur. Bu çalışmada da kanal modellemesi olarak [18] numaralı çalışma referans alınmıştır. Çalışmada ayrıca İHA Bİ'nin kapasitesi ve kullanıcıların talep ettikleri veri hızlarına göre bir İHA Bİ'nin kaç adet kullanıcıya hizmet verebileceği ve buna bağlı olarak sistemde kaç adet İHA Bİ'ye ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır. Kullanıcılar için SGO alt eşik seviyesi de belirlenerek kullanılan İHA Bİ sayısı minimize edilmeye çalışılmıştır. Çözüm için parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasından faydalanılmıştır. Örnek bir sonuç Şekil 2.6'da paylaşılmıştır [24].

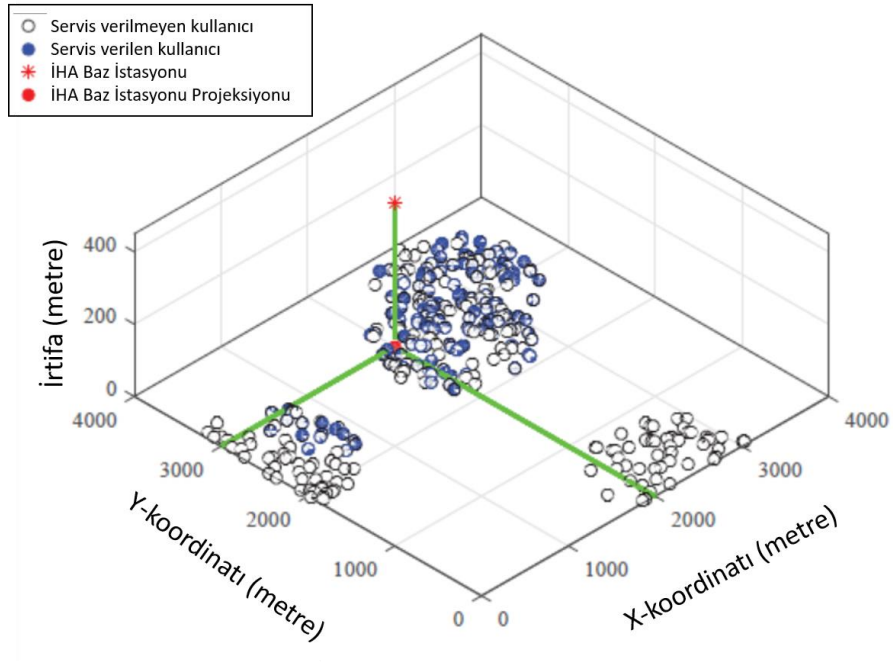


Şekil 2.6. Kullanıcı yoğunlukları ve İHA Bİ'nin 2 boyutlu yerleşimi [24]

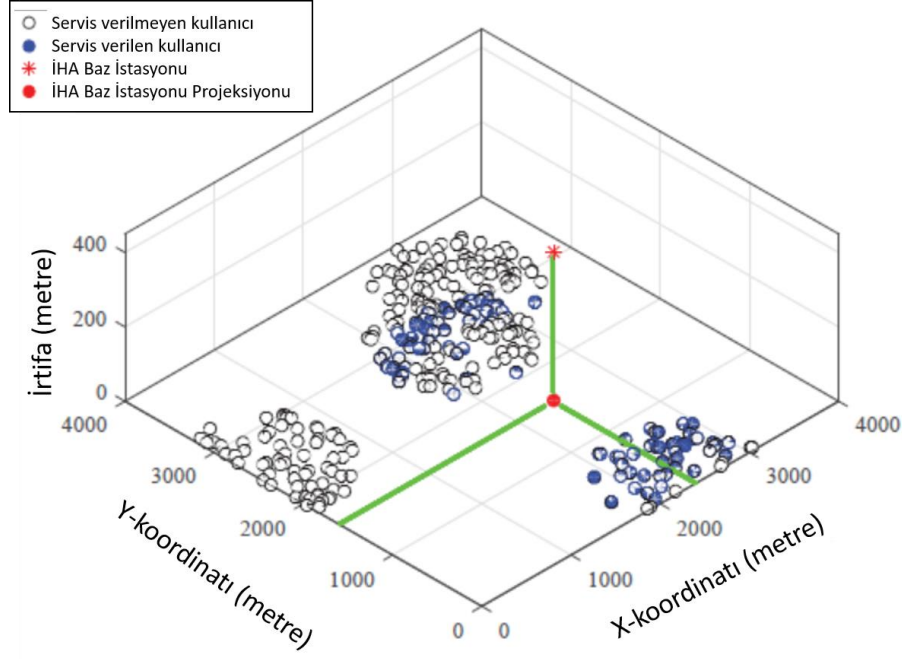
Görselden de görüleceği üzere kullanıcı yoğunluğunun az olduğu bölgelerde daha az İHA Bİ'yi daha yükseğe konumlandırarak geniş kapsama alanı elde edilebilmiştir. Yoğun alanlarda ise İHA Bİ'nin kapasite kısıtından dolayı daha küçük alanda yine benzer sayıda kullanıcıya hizmet verilmiştir [24].

2017 yılında Kalantari, Shakir, Yanıkömeroğlu ve Yongacoğlu, [25] numaralı çalışmada, bir önceki çalışmaya İHA Bİ ile yer Bİ arasındaki kablosuz ana taşıyıcı bağın kullanılabilirliğini de ekleyerek çalışmayı ilerletmişlerdir. Eski çalışmada servis sağlanan kullanıcı sayısı İHA Bİ'nin kapasitesine bağlıyken, yeni çalışmada kablosuz ana taşıyıcı bağın kapasitesi de kullanıcı sayısına etki eden bir faktör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada İHA Bİ yerleşimi için ağ merkezli ve kullanıcı merkezli olmak üzere iki farklı yöntem izlenmiştir. Ağ merkezli yöntemde amaç servis sağlanan kullanıcı sayısını

maksimize etmektir ve bu yöntem genellikle daha az veri hızına ihtiyaç duyan kullanıcılara hizmet etmeyi tercih etmektedir. Kullanıcı merkezli yöntemde ise kullanıcılara atanan öncelik değerlerine göre servis verilmeye çalışılmaktadır. Örnek bir senaryoda her iki yaklaşım için İHA Bİ yerleşimleri Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilmektedir [25].



Şekil 2.7. Ağ merkezli İHA Bİ yerleşimi [25]



Şekil 2.8. Kullanıcı merkezli İHA Bİ yerleşimi [25]

Şekillerde de görüldüğü üzere ağ merkezli yerleşimde daha çok kullanıcı sayısına servis verilmiştir. Kullanıcı merkezli yerleşimde ise daha az sayıda ancak önceliği daha fazla olan kullanıcılara hizmet verilmiştir.

Alzenad, El-Keyi, Lagum ve Yanıkömeroğlu'nun [26] numaralı çalışmasında, pek çok İHA Bİ yerleşimi için önce hava-yer kanal modelinden yararlanarak en iyi alıcı gücünü sağlayacak olan yüksekliği hesaplamışlar, ardından da çember paketleme teorisinden faydalanarak İHA Bİ'lerin 2 boyutlu düzlemsel yerleşimini çalışmışlardır. Böylece İHA Bİ'lerin 3 boyutlu yerleşimini belirlemişlerdir.

Bu başlık altında sunulmuş olan çalışmalar incelendiğinde her birinin İHA Bİ yerleşimine yönelik olarak farklı konulara yoğunlaştıkları görülmektedir. Çoğunlukla RF yol kaybı için aynı model kullanılmış olsa da bunun dışındaki diğer konularda farklılıklar görülmektedir. Kimi çalışmalarda kullanıcı dağılımı düzenli iken, kimlerinde rastgele dağıtılmıştır. Kimi çalışmalarda anten kazançları ve ışın genişlikleri hesaba katılırken, kimilerinde bu konulara değinilmemiştir. Kimileri için ana hedef kullanıcı servis kalitesi

artırmakken, kimileri için daha az RF gönderme gücü kullanmak, kimileri için alanı olduğunca kapsamak, kimileri için servis verilen kullanıcı sayısını artırmak olmuştur. Bu bağlamda; çalışmalarda bir veya birden çok İHA Bİ için sadece yükseklik, sadece düzlemsel veya 3 boyutlu yerleşim çalışmaları yapılmıştır ve bütün bu çalışmaların literatüre büyük katkısı olmuştur.

Bu tez çalışmasında ise, anlatılan çalışmalarda göz ardı edilmiş olan İHA servis süresi ön planda tutulmaktadır. Bataryalarının sınırlı olması nedeni ile İHA'ların servis verebilecekleri süre de kısıtlı olmaktadır. Bu nedenle bu süreyi uzatabilmek için İHA Bİ'nin kullandığı RF gönderme gücü, devre gücü ve aerodinamik güçler hesaba katılarak bir optimizasyon yapılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm modeller bir sonraki başlık altında detaylı olarak açıklanmaktadır.

### 3. ÇALIŞMADA KULLANILAN SİSTEM MODELLERİ

Çalışmada İHA baz istasyonunun harcadığı gücün; aerodinamik güç, RF gönderme gücü ve devre gücü bileşenlerinden oluştuğu varsayılmıştır. İHA'nın bunlar dışında harcaması muhtemel güçler hesaba katılmamıştır. Bu başlık altında çalışmada kullanılmış olan aerodinamik model, kanal modellemesi, anten modeli, servis kalitesi ve İHA bataryası detaylı olarak incelenmiştir.

#### 3.1. Aerodinamik Model

Tez çalışması kapsamında irdelenen İHA modeli alçak irtifada uçan döner kanatlı bir platformdur ve taslak bir model görseli Şekil 1.7'de verilmektedir. İHA'nın aerodinamik gücü için bir diğer döner kanatlı platform olan helikopterlerin aerodinamiğinden faydalanılmıştır. Döner kanatlı İHA aerodinamiği için bu yaklaşım [27], [28], [29] ve [30] numaralı çalışmalarda da yer almaktadır.

Döner kanatlı platformların havada durma gücü; indüklenmiş güç ve profil gücünden oluşmaktadır. Her iki güç de hava yoğunluğuna bağlıdır. Bu nedenle bu başlık altında önce hava yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişimi, ardından indüklenmiş güç ve profil gücü, son olarak da bunların toplamı olan havada durma gücü açıklanmaktadır. Çalışma kapsamında İHA'nın yükselme, alçalma, rüzgara karşı koyma, yer etkisi vb. güçleri hesaba katılmamıştır.

##### 3.1.1. Atmosfer Modeli

[31] ve [32] kaynaklarında, aerodinamik formüllerinde kullanılan hava yoğunluk modeli

$$\rho_h = \rho_0 \exp(-u_0 h_a), \quad h_a \leq 6000 \text{ m} \quad (1)$$

ile verilmektedir.

- $h_a$ : İHA baz istasyonunun deniz seviyesinden yüksekliği (m)
- $\rho_h$ :  $h_a$  yüksekliğinde hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\rho_0$ : deniz seviyesinde hava yoğunluğu ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )

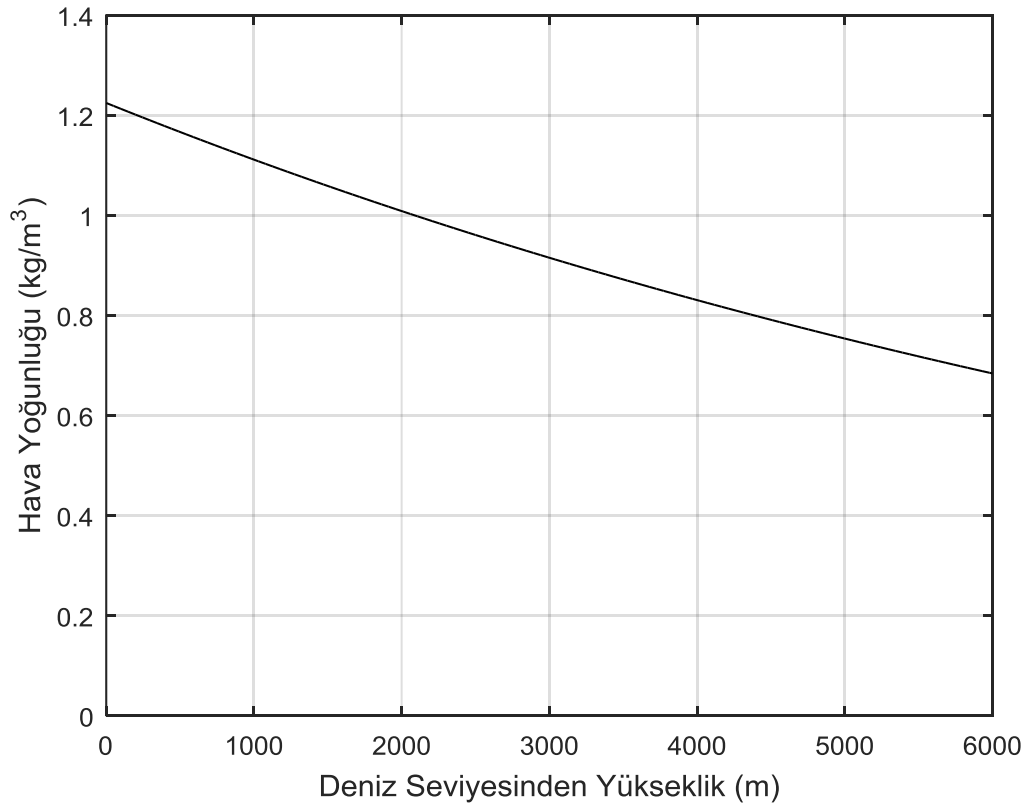
- $u_0$ : sabit ( $9.7 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ )

İHA baz istasyonunun deniz seviyesinden yüksekliği; şehrin rakımı ve İHA'nın yerden yüksekliğinin toplamına eşittir:

$$h_a = h_c + h \quad (2)$$

- $h_c$ : şehrin rakımı (m)
- $h$ : İHA'nın yerden yüksekliği (m)

Eşitlik (1)'e göre deniz seviyesinden yüksekliğe bağlı olarak hava yoğunluğu Şekil 3.1 'de gösterildiği gibi üstel biçimde değişmektedir.



Şekil 3.1. Hava Yoğunluğu - Yükseklik Grafiği

Eşitlik (1) üstel olmasına rağmen grafik doğrusal bir görünüme sahiptir. Bunun nedeni üstel fonksiyonun içinde yer alan  $u_0$  sabitinin çok küçük bir değere sahip olmasıdır.

Bu formüle göre birkaç örnek şehrin rakımında hava yoğunluğu Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Şehirlerin Rakımları ve Hava Yoğunlukları

| Şehir İsmi | Rakım (m) | Hava Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------|-----------|-------------------------------------|
| İstanbul   | 40        | 1.2203                              |
| Ankara     | 1050      | 1.1064                              |
| Erzurum    | 1900      | 1.0188                              |

Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere farklı rakımlardaki şehirler için hava yoğunluğu dikkate değer şekilde değişmektedir. Bu nedenle farklı şehirlerdeki İHA baz istasyonu yerleşimlerinde yüksekliği hesaba katmak önemlidir.

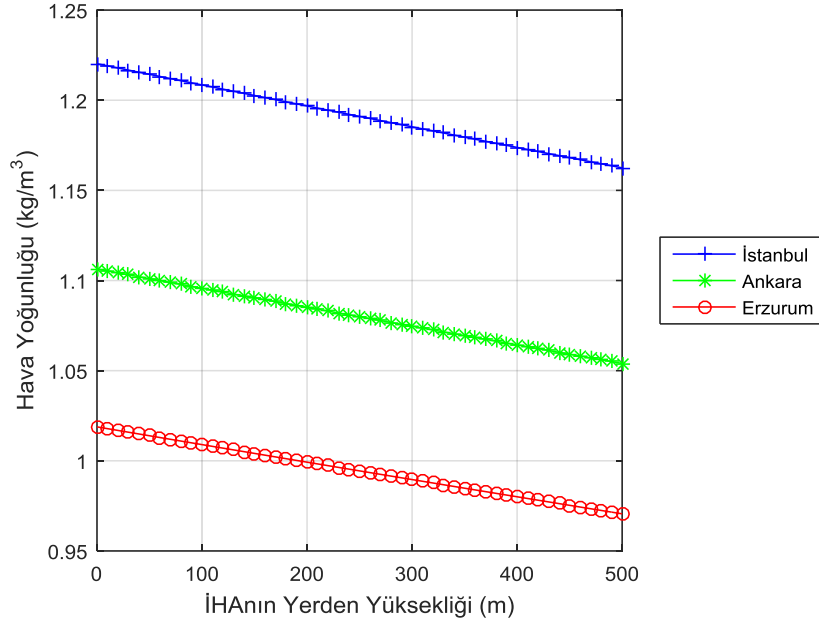
Bir şehirde İHA baz istasyonu yüksekliğinin en fazla 500 metre olabileceğini varsayarsak bu yükseklikteki hava yoğunluğunun, aynı rakımlı şehirde yer seviyesindeki hava yoğunluğuna oranı

$$\frac{\rho_{h+500}}{\rho_h} = \frac{\rho_0 \exp(-u_0(h_a+500))}{\rho_0 \exp(-u_0 h_a)} = \exp(-500u_0) = 0.9527, \quad h_a \leq 6000 \text{ m} \quad (3)$$

biçiminde olacaktır.

İstanbul, Ankara ve Erzurum’da 0-500 metre arası yükseklikte hava yoğunluğunun değişimi Şekil 3.2’de verilmektedir.



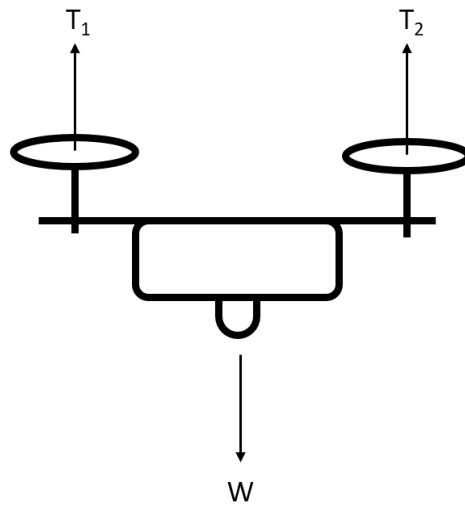


Şekil 3.2. Hava Yoğunluğu - Yükseklik Grafiği

### 3.1.2. İndüklenmiş Güç

İndüklenmiş güç; İHA ağırlığını dengelemek için amacıyla rotorda itki oluşturulması için gereken güçtür.

İHA havada durma pozisyonundayken pervanelerin yukarı yönlü uyguladığı itki ( $T$ ) ile İHA'nın ağırlığı denge durumundadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. İHA'nın Havada Durması

$$T_{toplaml} = W_{toplaml} \quad (4)$$

$$W_{toplaml} = m_{toplaml}g \quad (5)$$

- $T_{toplaml}$ : tüm rotorların oluşturduğu toplam itki (N)
- $W_{toplaml}$ : İHA Bİ'nin ağırlığı (N)
- $m_{toplaml}$ : İHA Bİ'nin kütlesi (kg)

İHA Bİ'nin kütlesi; İHA'nın kütlesi, baz istasyonu kütlesi ve batarya kütlelerinin toplamından oluşmaktadır:

$$m_{toplaml} = m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat}m_{bat} . \quad (6)$$

- $m_{iHA}$ : İHA kütlesi (kg)
- $m_{bi}$ : baz istasyonu kütlesi (kg)
- $N_{bat}$ : batarya sayısı
- $m_{bat}$ : batarya kütlesi (kg)

Tüm rotorların aynı olduğu bir İHA için, tüm rotorların oluşturduğu toplam itki; rotor sayısı ile tek bir rotorun oluşturduğu itkisinin çarpımına eşit olacaktır.

$$T_{toplaml} = N_{rotor}T_{tek} \quad (7)$$

- $N_{rotor}$ : rotor sayısı
- $T_{tek}$ : tek bir rotorun oluşturduğu itki (N)

Bir rotor diskinde indüklenen hız ile itki arasındaki ilişki

$$v_i = \sqrt{\frac{T_{tek}}{2\rho_h A}} \quad (8)$$

ile verilmektedir [33].

- $v_i$ : indüklenmiş hız (m/s)
- $A$ : pervanenin taradığı alan (m<sup>2</sup>)

Bu formül  $T_{toplaml}$  cinsinden

$$v_i = \sqrt{\frac{T_{toplaml}}{2\rho_h AN_{rotor}}} \quad (9)$$

olarak yazılabilir.

Bu formülden yararlanarak tüm rotorların oluşturduğu toplam itkiyi

$$T_{toplaml} = 2\rho_h AN_{rotor} v_i^2 \quad (10)$$

ile ifade edebiliriz.

Görüldüğü üzere itki; hava yoğunluğu, pervanenin taradığı alan ve rotor sayısı ile doğru, indüklenmiş hızın ise karesi ile doğru orantılıdır.

Güç; kuvvet ve hızın çarpımından oluştuğu için indüklenmiş güç şu şekilde ifade edilebilir [31]:

$$P_i = T_{toplaml} v_i \quad (11)$$

- $P_i$ : İndüklenmiş güç (W)

Eşitlik (11)'in içinde yer alan  $T_{toplaml}$ 'ı, Eşitlik (10)'da verildiği şekilde açıkça yazarsak

$$P_i = 2\rho_h AN_{rotor} v_i^3 \quad (12)$$

formülünü elde ederiz.

Eşitlik (11)'in içinde yer alan  $v_i$ 'yi, Eşitlik (9)'da verildiği şekilde açıkça yazarsak

$$P_i = T_{toplaml} \sqrt{\frac{T_{toplaml}}{2\rho_h AN_{rotor}}} \quad (13)$$

$$P_i = \frac{T_{toplaml}^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho_h AN_{rotor}}} \quad (14)$$

formüllerini elde ederiz.

Eşitlik (14)'e Eşitlik (1), (4), (5), (6) ve  $A = \pi \times R^2$  eşitliklerini koyarsak

$$P_i = \frac{((m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat}m_{bat})g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\pi R^2 N_{rotor} \rho_0 \exp(-u_0 h_a)}} \quad (15)$$

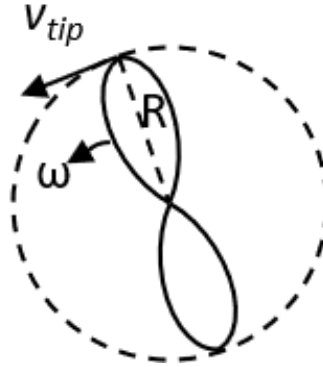
biçimine dönüşür.

### 3.1.4. Profil Gücü

Profil gücü, döner kanatlı platformun pervane kanatçıklarındaki sürtünme kuvvetinin üstesinden gelmek için gerekli olan güçtür. Profil gücü [34]'te aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$P_0 = \rho_h \left[ A v_{tip}^3 \frac{(\sigma C_{D_0})}{8} \right] N_{rotor} \quad (16)$$

- $P_0$ : profil gücü (N)
- $v_{tip}$ : pervanenin uç noktasının hızı (m/s)
- $\sigma$ : rotor katılığı (-)
- $C_{D_0}$ : sürtünme katsayısı (-)



Şekil 3.4. Pervane uç hızı ile açısal hız arasındaki ilişki

Pervane uç noktasının hızı; pervane açısal hızı ile pervane yarıçapının çarpımına eşittir.

$$v_{tip} = \omega R \quad (17)$$

- $\omega$ : pervane açısal hızı (rad/s)
- $R$ : pervane yarıçapı (m)

Pervane açışal hızı ile indüklenmiş hız arasındaki ilişki [32]'de

$$\omega = \frac{v_i}{JR} \quad (18)$$

ile verilmektedir.

- $J$ : Pervane ilerleme oranı

Eşitlikler (17) ve (18) birleştirildiğinde aşağıdaki sonuca ulaşılır:

$$v_{tip} = \omega R = \frac{v_i}{JR} R = \frac{v_i}{J} \quad (19)$$

Eşitlik (19)'da elde edilen bağlantı, Eşitlik (16)'ya konulduğunda profil gücü ile indüklenmiş güç arasında bir bağlantı olduğu ortaya çıkmaktadır:

$$P_0 = \rho_h \left[ A \left( \frac{v_i}{J} \right)^3 \frac{(\sigma C_{D0})}{8} \right] N_{rotor} \quad (20)$$

$$P_0 = 2\rho_h N_{rotor} A v_i^3 \frac{\sigma C_{D0}}{16J^3} \quad (21)$$

$$P_0 = P_i \frac{\sigma C_{D0}}{16J^3} \quad (22)$$

Eşitlik (22)'de görüldüğü üzere profil gücü ile indüklenmiş güç doğru orantılıdır.

Rotor katılığı formülü [35]'te

$$\sigma = \frac{c_l N_{kanatçık}}{2\pi R} \quad (23)$$

olarak verilmektedir.

- $c_l$ : Pervane kanatçık genişliği (m)

Bu durumda profil gücü aşağıda verildiği biçime dönüşür:

$$P_0 = P_i \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3} \quad (24)$$

### 3.1.5. Havada Durma Gücü

Döner kanatlı platformların havada durma gücü; indüklenmiş güç ve profil gücünün toplamından oluşur [34].

$$P_H = P_i + P_0 \quad (25)$$

$$P_H = P_i + P_i \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3} \quad (26)$$

$$P_H = P_i \left( 1 + \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3} \right) \quad (27)$$

$$P_H = \frac{((m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat} m_{bat})g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\pi R^2 N_{rotor} \rho_0 \exp(-u_0(h_c + h))}} \left( 1 + \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3} \right) \quad (28)$$

- $P_H$ : havada durma gücü (W)

Eşitlik (28) incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- İHA Bİ'nin kütlesi arttıkça havada kalması için ihtiyaç duyduğu güç artacaktır.
- Yükseklik arttıkça havada kalma gücü artacaktır. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir: İHA, havada durabilmesi için pervane aracılığıyla ortamdaki gazı aşağı itmeli. Yükseklik arttıkça gaz miktarı azalacağı için, İHA rotorlarının aynı miktarda itkiyi oluşturabilmek için daha hızlı dönmesi gerekecektir. Bu nedenle yükseklik arttıkça harcanan güç artacaktır.
- Rotor sayısı, pervane yarıçapı, pervane ilerleme oranı arttıkça havada durma gücü azalacaktır.
- Pervane kanatçık genişliği, kanatçık sayısı ve sürtünme katsayısı arttıkça havada kalma gücü artacaktır.

Eşitlik (28)'de verilen havada durma gücü döner kanatlı araçların aerodinamiğini ifade etmekte ve belirli çalışma aralığı için geçerli olmaktadır. Tez çalışmasında İHA parametreleri için tipik değerler kullanılmış olup bu değerler Kısım 4.1. Çalışmada Kullanılan Değerler altında verilmiştir ve çalışma kapsamında parametre incelemeleri bu değerler etrafında değerlendirilmiştir.

### 3.2. Kanal Modellemesi

ITU'nun P.1410-5 numaralı öneri kitapçığı [35], 3 ile 60 GHz frekans aralığında karasal geniş bantlı radyo erişim sistemlerinin tasarımı için gerekli propagasyon veri ve tahmin yöntemlerini anlatmaktadır. Bu kitapçık, ilgili frekans bantlar arasında ışın izlemeye ilişkin olarak; yansıma, pürüzlü yüzeyde saçılım, bağ bütçe analizi, binaların içinden iletim, kapsama tahminleri, bitki örtüsü nedeniyle sinyal zayıflaması, arazi tanımlamaları, yağmurun yayılımı etkisi, girişim gibi başlıklar altında bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada farklı arazi türlerini modellemek için  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  parametreleri tanımlanmıştır. Bu parametrelerin anlamları şu şekildedir [38]:

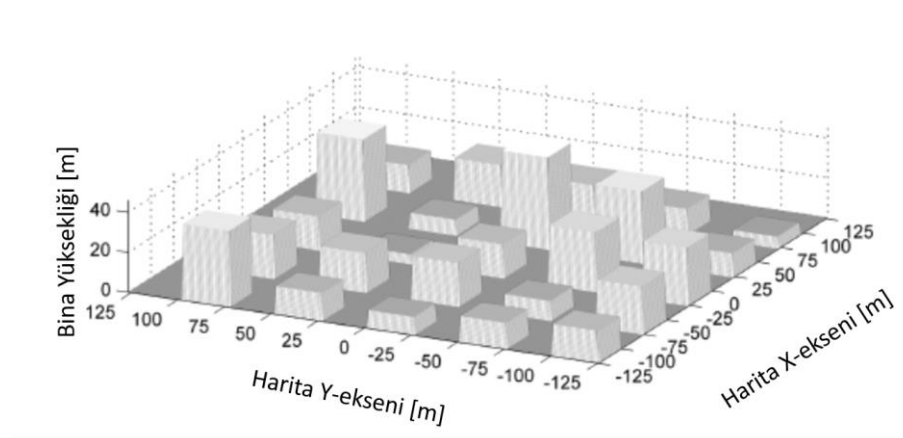
- $\alpha$ : binalarla kaplı alanın toplam alana oranı
- $\beta$ : birim alandaki bina sayısı (bina sayısı/km<sup>2</sup>)
- $\gamma$ : bina yüksekliği için kullanılan Rayleigh dağılımında bir parametre

Bu kitapçıkta dört farklı çevre tipi için tablo, metin veya grafikler içinde belirtilen parametreler, Al-Hourani tarafından [18] numaralı çalışmada Çizelge 3.2'de verildiği şekilde özetlenmiştir:

Çizelge 3.2. Çevre Tipleri için Parametreler

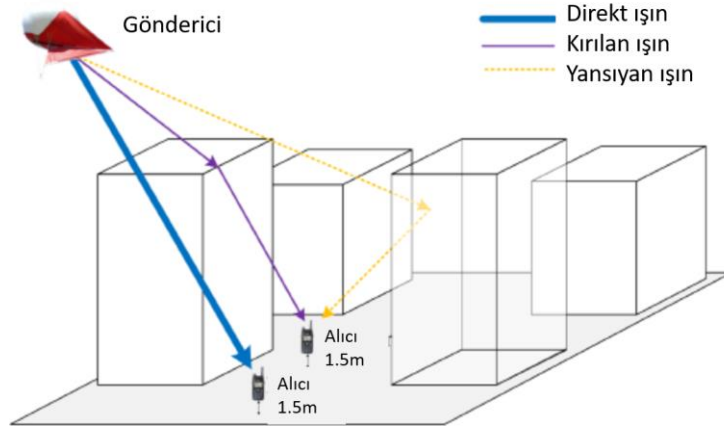
| Çevre                | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ |
|----------------------|----------|---------|----------|
| Kırsal               | 0.1      | 750     | 8        |
| Kentsel              | 0.3      | 500     | 15       |
| Yoğun kentsel        | 0.5      | 300     | 20       |
| Yüksek katlı kentsel | 0.5      | 300     | 50       |

El-Hourani [18] numaralı çalışmada, ITU'nun kitapçığından yola çıkarak alçak irtifa için hava-yer kanal modeli oluşmuştur. Öncelikle ITU parametrelerine uygun olarak, 1 km x 1 km alana sahip şehir modelleri oluşturmuştur. Oluşturulan örnek bir şehir modeli Şekil 3.5'de verilmektedir.



Şekil 3.5. ITU parametrelerine uygun olarak bilgisayarda oluşturulan örnek bir şehir modeli [18]

Al-Hourani, oluşturduğu bu şehir modellerinde yere 37000'den fazla alıcıyı düzenli bir şekilde dağıtmış ve bir göndericiyi çeşitli yüksekliklere koyarak ışın izleme kodu yardımıyla her bir alıcı için RF yol kaybını hesaplamıştır. Işın izleme için Şekil 3.6'da gösterildiği üzere göndericiden alıcıya doğrudan ulaşan ışınlar, binadan kırılıp ulaşan ışınlar ve binadan yansıyıp ulaşan ışınları hesaba katmıştır.



Şekil 3.6. Işın izleme [18]

Yaptığı çalışma sonucunda RF yol kaybını şu şekilde modellemiştir [18, 19]:

$$P_{loss,dB} = P_{loss,LoS,dB} P(LoS, \varphi) + P_{loss,NLoS,dB} P(NLoS, \varphi) \quad (29)$$

- $P_{loss,dB}$ : RF yol kaybı (dB)



- $P_{loss,LoS,dB}$ : Doğrudan görüş hattı olduğu durumda RF yol kaybı (dB)
- $P_{loss,NLoS,dB}$ : Doğrudan görüş hattı olmadığı durumda RF yol kaybı (dB)
- $P(LoS, \varphi)$ : Gönderici ile alıcı arasında  $\varphi$  derece açı varken doğrudan görüş hattı olma olasılığı
- $P(NLoS, \varphi)$ : Gönderici ile alıcı arasında  $\varphi$  derece açı varken doğrudan görüş hattı olmama olasılığı

Eşitlik (29)'da yer alan gönderici ile alıcı arasında doğrudan görüş hattı olma olasılığı ile görüş hattı olmama olasılığı arasında, olasılık teorisinden dolayı

$$P(NLoS, \varphi) = 1 - P(LoS, \varphi) \quad (30)$$

biçiminde bir ilişki bulunmaktadır.

Gönderici ile alıcı arasında doğrudan görüş hattı olma olasılığı ise şu şekildedir [19]:

$$P(LoS, \varphi) = \frac{1}{1 + k \exp(-l(\varphi - k))} \quad (31)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta_B}{2} \quad (32)$$

$$k = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^{3-j} K_{ij} (\alpha\beta)^i \gamma^j \quad (33)$$

$$l = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^{3-j} L_{ij} (\alpha\beta)^i \gamma^j \quad (34)$$

Eşitlikler (33) ve (34)'te yer alan **K** ve **L** matrisleri Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilmiştir [19]:

Çizelge 3.3. **K** matrisi [19]

| $K_{ij}$ | $i = 0$                | $i = 1$                | $i = 2$                | $i = 3$               |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| $j = 0$  | $9.34 \times 10^{-1}$  | $2.30 \times 10^{-1}$  | $-2.25 \times 10^{-3}$ | $1.86 \times 10^{-5}$ |
| $j = 1$  | $1.97 \times 10^{-2}$  | $2.44 \times 10^{-3}$  | $6.58 \times 10^{-6}$  | -                     |
| $j = 2$  | $-1.24 \times 10^{-4}$ | $-3.34 \times 10^{-6}$ | -                      | -                     |
| $j = 3$  | $2.73 \times 10^{-7}$  | -                      | -                      | -                     |

Çizelge 3.4. **L** matrisi [19]

| $L_{ij}$ | $i = 0$                | $i = 1$                | $i = 2$                | $i = 3$                |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $j = 0$  | 1.17                   | $-7.56 \times 10^{-2}$ | $1.98 \times 10^{-3}$  | $-1.78 \times 10^{-5}$ |
| $j = 1$  | $-5.79 \times 10^{-3}$ | $1.81 \times 10^{-4}$  | $-1.65 \times 10^{-6}$ |                        |
| $j = 2$  | $1.73 \times 10^{-5}$  | $-2.02 \times 10^{-7}$ | -                      |                        |
| $j = 3$  | $-2.00 \times 10^{-8}$ | -                      | -                      |                        |

Doğrudan görüş hattı olduğu durumda RF yol kaybı (dB) ve doğrudan görüş hattı olmadığı durumda RF yol kaybı (dB) formülleri ise şu şekildedir [19]:

$$P_{loss,LoS,dB} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + \eta_{LoS,dB} \quad (35)$$

$$P_{loss,NLoS,dB} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + \eta_{NLoS,dB} \quad (36)$$

$$d = \frac{h}{\cos\left(\frac{\theta_B}{2}\right)} \quad (37)$$

$\eta_{LoS,dB}$  ve  $\eta_{NLoS,dB}$  değerleri farklı frekans ve farklı çevre tiplerine göre değişkenlik göstermektedir.

Eşitlikler (29), (30), (31), (35) ve (36)'yı birleştirdiğimizde

$$P_{loss,dB} = \frac{\eta_{LoS,dB} - \eta_{NLoS,dB}}{1 + k \exp(-l(\varphi - k))} + 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{c}\right) + \eta_{NLoS,dB} \quad (38)$$

ifadesine ulaşılır [19].

RF yol kaybını dB cinsinden değil, birimsiz olarak yazmak istersek (38) numaralı formül şu biçime dönüşecektir:

$$P_{loss} = \left( \frac{4\pi f h}{c \cos\left(\frac{\theta_B}{2}\right)} \right)^2 10^{\frac{1}{10} \left( \frac{\eta_{LoS,dB} - \eta_{NLoS,dB}}{1 + k \exp\left(-l\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_B}{2} - k\right)\right)} + \eta_{NLoS,dB} \right)} \quad (39)$$

### 3.3. Anten Modeli

Çalışmada, [37]'de verilen anten modeli referans alınmıştır. Buna göre alıcı ve verici antenlerin kazançları şu biçimdedir:

$$G_{Tx} = \frac{4\pi f^2 A_{et}}{c^2}, -\frac{\theta_B}{2} \leq \psi \leq \frac{\theta_B}{2} \quad (40)$$

$$G_{Rx} = \frac{4\pi f^2 A_{er}}{c^2}, -\frac{\theta_B}{2} \leq \psi \leq \frac{\theta_B}{2} \quad (41)$$

- $A_{et}$ : Gönderici antenin etkin alanı ( $m^2$ )
- $A_{er}$ : Alıcı antenin etkin alanı ( $m^2$ )
- $\theta_B$ : yarım-güç ışın genişliği

### 3.4. Servis Kalitesi

Tez çalışmasında kullanıcılar için servis kalitesi hesaplamalarında Sinyal-Gürültü Oranı (SGO) kullanılacaktır. SGO; alınan sinyal gücünün gürültü gücüne oranıdır.

$$\gamma = \frac{P_{RX}}{P_N} \quad (42)$$

- $\gamma$ : Sinyal-Gürültü Oranı
- $P_{RX}$ : Alıcı sinyal gücü (W)
- $P_N$ : Gürültü gücü (W)

Alınan sinyal gücü; gönderme gücü ve anten kazançları ile doğru, RF yol kaybı ile ters orantılıdır.

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} G_{Tx} G_{Rx}}{P_L} \quad (43)$$

Gürültü gücü ise gürültü izgel yoğunluğu ve bantgenişliğinin çarpımından oluşur.

$$P_N = N_0 B \quad (44)$$

Eşitlikler (43) ve (44)'ü, Eşitlik (42)'nin içine açık şekilde yazdığımız SGO

$$\gamma = \frac{P_{RX}}{P_N} = \frac{\frac{P_{TX}G_{Tx}G_{Rx}}{P_{loss}}}{N_0B} = \frac{P_{TX}G_{Tx}G_{Rx}}{P_{loss}N_0B} \quad (45)$$

olarak ortaya çıkmaktadır.

### 3.5. İnsansız Hava Aracı Bataryası

İHA baz istasyonu; hem havada durma gücünü, hem devre gücünü, hem de RF gönderme gücünü sağlayabilmek için yeterli miktarda enerjiye sahip olmalıdır. Türlerine göre İHA'lar güçlerini üstlerinde yer alan bataryalardan alabilecekleri gibi, sıvı tip yakıt kullanabilirler veya yerden kablo ile güç alabilirler. Tez çalışmasında İHA olarak alçak irtifada seyreden döner kanatlı platformlar referans alındığı için batarya kullanımı incelenecektir.

İHA için batarya araştırıldığında, güncel teknolojiye Lityum Polimer (LiPo) tip bataryalar kullanıldığı görülür. Bataryanın İHA'ya sağlayacağı güç; batarya sayısı, batarya gerilimi ve kapasitesi ile doğru orantılıdır.

$$E_{İHA} = N_{bat}VC \quad (46)$$

- $E_{İHA}$ : İHA enerjisi (mWh)
- $N_{bat}$ : Batarya sayısı
- $V$ : Batarya gerilimi (V)
- $C$ : Batarya kapasitesi (mAh)

Batarya kapasiteleri mAh, gerilimleri Volt cinsinden ifade edildiği için enerjileri bu ikisinin çarpımından mWh olacaktır. İHA'nın çalışma süreleri dakikalar mertebesinde olduğu için enerjiyi Watt x dakika cinsinden ifade etmek daha uygun olacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada İHA enerjisi şu şekilde ifade edilecektir:

$$E_{İHA,W \times dk} = \frac{60}{1000} N_{bat}VC \quad (47)$$

- $E_{İHA,W \times dk}$ : İHA enerjisi (W×dakika)

#### 4. İNSANSIZ HAVA ARACI BAZ İSTASYONU YERLEŞİM SENARYOLARI VE SONUÇLARI

Literatürde İHA Bİ yerleşimleri incelendiğinde genellikle RF gönderme gücünü enküçülten, servis verilen kullanıcı sayısını enbüyülten veya verilen bir alanı mümkün en az sayıda İHA Bİ ile kapsamaya çalışan yerleşimler üzerinde çalışıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında ise amaç; İHA Bİ operasyon süresinin enbüyültülmeye çalışılmasıdır. Bu amaçla tez çalışmasında, İHA Bİ operasyon süresini enbüyülten farklı yerleşim senaryoları tanımlanmış ve bu senaryoların sonuçları kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

İHA Bİ operasyon süresi; bataryanın verdiği enerjinin İHA Bİ toplam gücüne bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$T_{op} = \frac{E_{IHA,Wdk}}{P_{IHA}} \quad (48)$$

İHA Bİ'nin uçuş aşamaları yükselme, havada durma ve iniş yapma şeklinde özetlenebilir. Yükselme aşamasında İHA, park pozisyonundan görev yapacağı lokasyona intikal etmektedir. Bu aşamada hem yükselme, hem de devre gücü harcamaktadır. İkinci aşamada İHA, baz istasyonu olarak görevini icra etmekte ve bu aşamada havada durma gücü, devre gücü ve RF gönderme gücü harcamaktadır. Son aşamada ise İHA, görev konumundan park alanına giderek iniş yapmaktadır. Bu aşamada alçalma gücü ve devre gücü harcamaktadır. Ayrıca İHA'nın, havanın rüzgarlı olması durumunda rüzgara karşı koymak için aerodinamik güç ve iniş esnasında yer etkisi ile karşılaşması durumunda ilave güçler harcaması gerekebilecektir.

İHA Bİ'nin uçuş süresinin büyük bir kısmını havada durma süresi oluşturduğu için ve rüzgar, yer etkisi gibi durumların az rastlanacağı düşünüldüğü için bu tez çalışmasında yükselme, alçalma, rüzgara karşı koyma, yer etkisi vb. güçler de ihmal edilmiştir. İHA Bİ gücü olarak havada durma aşamasında harcanan havada durma gücü, devre gücü ve RF gönderme gücü hesaba katılmıştır.

$$T_{op} = \frac{E_{IHA,Wdk}}{P_H + P_{cir} + P_{TX}} \quad (49)$$

Havada durma gücü ve RF gönderme gücü İHA Bİ yüksekliğine göre değişkenlik göstermektedir. Devre gücünün ise yükseklikten bağımsız olarak sabit bir değere sahip olduğu kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında üç senaryo üzerinde durulmuştur.

İlk senaryoda devre ve havada durma güçleri sabit kabul edilip RF gönderme gücü üzerinden İHA Bİ operasyon süresi enbüyütmeye çalışılmıştır. Burada amaç sadece haberleşme parametreleri göz önüne alındığında nasıl bir yerleşim sonucu çıktığını incelemektir. Bu senaryo gerçekçi değildir, nedeni ise bu senaryonun sonuçlarında paylaşılacağı gibi havada durma gücünün yüksekliğe bağlı olarak değişiminin RF gönderme gücünün değişimine kıyasla çok büyük olmasıdır. Bu nedenle havada durma gücünü sabit kabul etmek İHA Bİ yerleşimine bütünsel bakış açısını bozmaktadır ancak literatürde sıklıkla bu yaklaşımın kullanıldığı görülmektedir. Literatür taraması başlığı altında incelenmiş olan çalışmalarda havada durma gücünün hep ihmal edilmiş olduğu görülmektedir ve bu da bu çalışmaların sonuçlarının gerçeklikten uzak olmasına neden olmaktadır.

İlk senaryo kendi içinde farklı alt senaryolara bölünmektedir:

- İlk alt senaryoda anten yarım-güç ışın genişliği sabit tutulup RF gönderme gücünün, belirlenmiş minimum SGO seviyesini sağlayacak şekilde yüksekliğe bağlı değişimi ve bunun İHA operasyon süresine etkisi incelenmektedir. Bu alt senaryoda kırsal, kentsel, yoğun kentsel ve yüksek katlı kentsel şeklinde farklı ortam etkileri de hesaba katılmakta ve sonuç kıyaslamalı şekilde sunulmaktadır.
- İkinci alt senaryoda anten yarım-güç ışın genişliği değişken kabul edilerek farklı yüksekliklerde farklı anten yarım-güç ışın genişlikleri için sağlanması gereken RF gönderme gücü ve bunun İHA operasyon süresine etkisi incelenmektedir.

İkinci senaryoda, devre ve RF gönderme gücü sabit kabul edilip havada durma gücü üzerinden İHA Bİ operasyon süresi enbüyültölmeye çalışılmıştır. Bu senaryo da gerçekçi değildir ancak buradaki amaç farklı İHA tasarım parametrelerinin havada durma gücüne ve operasyon süresine olan etkilerinin detaylı şekilde incelenmesi ve son senaryodaki bütönsel yaklaşım için altyapı oluşturmastır. Bu senaryo aşğıdaki alt çalışmaları içermektedir:

- Toplam İHA Bİ kütesinin havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi
- İHA Bİ pervane yarıçapının havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi
- İHA Bİ rotor sayısının havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi
- İHA Bİ kanatçık sayısının havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi
- İHA Bİ batarya sayısının havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi
- İHA Bİ rüzgar hızının havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresine etkisinin incelenmesi

Üçüncü senaryoda ise devre gücü sabit tutulup hem RF gönderme gücü, hem de havada durma gücü üzerinden İHA Bİ operasyon süresi enbüyültölmeye çalışılmıştır. Bu sayede İHA Bİ yerleşiminde önemli olan her iki konu da göz önüne alınarak daha bütönsel bir yaklaşım sergilenmiştir. Gerçek İHA Bİ yerleşimine en uygun olan senaryo budur.

#### **4.1. Çalışmada Kullanılan Değerler**

Tez çalışmasında kullanılan İHA teknik özellikleri, haberleşme özellikleri ve çalışılan şehirlere ilişkin bilgiler bu başlık altında yer almaktadır.

İHA tasarımı olarak 4 rotora ve 4 pervaneye sahip bir alçak irtifa platformu seçilmiştir. Her bir rotor pervanesinin 2 kanatçıktan oluştuğu varsayılmıştır. İHA'nın boyutları belirlenirken Turkcell Dronecell boyutlarına benzer değerler seçilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.1'de bir insanın yanında duran Turkcell Dronecell görünmektedir [12].



Şekil 4.1. Turkcell Dronecell büyüklüğü [12]

Bu görsele bakarak pervane yarıçapı 30 cm kabul edilmiştir. Pervane kanatçık genişliği de bu değerin %30'u olacak şekilde 9 cm seçilmiştir.

Pervane ilerleme oranı 0.12 ve sürüklenme katsayısı 0.01 belirlenmiştir.

Batarya büyüklüğü ve sayısı için yine Turkcell Dronecell'den faydalanılmıştır. Şekil 4.2'ye bakıldığında Dronecell'in 9 adet bataryaya sahip olduğu görülmektedir. Görselden bataryaların yaklaşık 2 kg ağırlığında, 24.5 V, 16000 mAh değere sahip olan modellerden olduğu tahmin edilmiştir.





Şekil 4.2. Dronecell Bataryaları [12]

Ayrıca İHA'nın boş ağırlığı 10 kg, baz istasyonu ağırlığı ise 6 kg kabul edilmiştir. İHA'nın devre gücünün 10 Watt civarında olduğu varsayılmıştır.

İHA tasarımına ilişkin bu değerler Çizelge 4.1'de paylaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. İHA Tasarım Değerleri

| Sembol         | Tanım                      | Değer | Birim |
|----------------|----------------------------|-------|-------|
| $N_{rotor}$    | İHA rotor sayısı           | 4     | -     |
| $J$            | Pervane ilerleme oranı     | 0.12  | -     |
| $N_{kanatçık}$ | Pervane kanatçık sayısı    | 2     | -     |
| $R$            | Pervane yarıçapı           | 0.30  | m     |
| $c_l$          | Pervane kanatçık genişliği | 0.09  | m     |
| $C_{D_0}$      | Sürüklenme katsayısı       | 0.01  | -     |
| $m_{İHA}$      | İHA kütlesi                | 10    | kg    |
| $m_{bi}$       | Baz istasyonu kütlesi      | 6     | kg    |
| $m_{bat}$      | Batarya kütlesi            | 2     | kg    |

|           |                    |       |     |
|-----------|--------------------|-------|-----|
| $N_{bat}$ | Batarya sayısı     | 9     | -   |
| $V$       | Batarya gerilimi   | 24.5  | V   |
| $C$       | Batarya kapasitesi | 16000 | mAh |
| $P_{cir}$ | Devre gücü         | 10    | W   |

Çalışmada kullanılan haberleşme parametreleri ise şu şekildedir:

Haberleşme frekansı olarak 2 GHz, bantgenişliği olarak 10 MHz belirlenmiştir. Tez çalışmasında kırsal, kentsel, yoğun kentsel ve yüksek katlı kentsel çevre tipleri için sonuçlar kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. Bu çevre tipleri için [18] ve [19] numaralı çalışmalarda 2 GHz frekans için verilmiş olan için  $\eta_{LoS,dB}$ ,  $\eta_{NLoS,dB}$ ,  $k$  ve  $l$  değerleri kullanılmıştır.

Gürültü izgel yoğunluğu -174 dBm olarak alınmıştır.

Minimum SGO seviyesi olarak ise -7 dB belirlenmiştir.

İHA Bİ’de kullanılan antenin yarım-güç ışın genişliği  $2\pi/3$  radyan, İHA Bİ’nin gönderici anteninin etkin alanı  $0.01 \text{ m}^2$ , kullanıcıların alıcı antenlerinin etkin alanı ise  $0.001 \text{ m}^2$  olarak alınmıştır.

Haberleşmeye ilişkin bu değerler Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2. Çalışmada Kullanılan Haberleşme Değerleri

| Sembol | Tanım         | Değer | Birim |
|--------|---------------|-------|-------|
| $f$    | Frekans       | 2     | GHz   |
| $B$    | Bantgenişliği | 10    | MHz   |

|                                 |                                                                                                                   |          |                |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------|
| $N_0$                           | Gürültü izgel yoğunluğu                                                                                           | -174     | dBm            |
| $\gamma_{min}$                  | En küçük sinyal-gürültü oranı                                                                                     | -7       | dB             |
| $\theta_B$                      | Yarım-güç ışıın genişliği                                                                                         | $2\pi/3$ | rad            |
| $A_{et}$                        | Gönderici antenin etkin alanı                                                                                     | 0.01     | m <sup>2</sup> |
| $A_{er}$                        | Alıcı antenin etkin alanı                                                                                         | 0.001    | m <sup>2</sup> |
| $\eta_{LoS,dB,kırsal}$          | Kırsal çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)                       | 0.1      | dB             |
| $\eta_{LoS,dB,kentsel}$         | Kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)                      | 1        | dB             |
| $\eta_{LoS,dB,yoğun\ kentsel}$  | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)                | 1.6      | dB             |
| $\eta_{LoS,dB,yüksek\ katlı}$   | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)         | 2.3      | dB             |
| $\eta_{NLoS,dB,kırsal}$         | Kırsal çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)               | 21       | dB             |
| $\eta_{NLoS,dB,kentsel}$        | Kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)              | 20       | dB             |
| $\eta_{NLoS,dB,yoğun\ kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için)        | 23       | dB             |
| $\eta_{NLoS,dB,yüksek\ katlı}$  | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde görüş hattı olmayan ortalama ilave yol kaybı (2 GHz frekans için) | 34       | dB             |

|                     |                                                                                             |         |   |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---|
| $k_{kırsal}$        | Kırsal çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)               | 4.8740  | - |
| $k_{kentsel}$       | Kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)              | 9.5328  | - |
| $k_{yoğun kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)        | 12.1190 | - |
| $k_{yüksek katlı}$  | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için) | 25.2740 | - |
| $l_{kırsal}$        | Kırsal çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)               | 0.4636  | - |
| $l_{kentsel}$       | Kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)              | 0.4095  | - |
| $l_{yoğun kentsel}$ | Yoğun kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için)        | 0.5137  | - |
| $l_{yüksek katlı}$  | Yüksek katlı kentsel çevre kanal modellemesinde kullanılan bir katsayı (2 GHz frekans için) | 3.2182  | - |

Son olarak çalışmada kullanılan şehirlerin rakımları ve bazı sabitler Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Çalışmada Kullanılan Şehirlerin Rakımları ve Bazı Sabitler

| Sembol    | Tanım                                          | Değer                | Birim             |
|-----------|------------------------------------------------|----------------------|-------------------|
| $h_{ist}$ | İstanbul rakımı                                | 40                   | m                 |
| $h_{ank}$ | Ankara rakımı                                  | 1050                 | m                 |
| $h_{erz}$ | Erzurum rakımı                                 | 1900                 | m                 |
| $\rho_0$  | Deniz seviyesindeki hava yoğunluğu             | 1.225                | kg/m <sup>3</sup> |
| $u_0$     | Hava yoğunluğu formülünde kullanılan bir sabit | $9.7 \times 10^{-5}$ | m <sup>-1</sup>   |

#### 4.2. RF Gönderme Gücü Göz Önüne Alınarak İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yerleşimi

İlk senaryoda; İHA Bİ konumunun havada durma gücünü ve devre gücü etkilemediği, sadece RF gönderme gücünü etkilediği varsayılmıştır ve bu koşullar altında İHA Bİ operasyon süresi enbüyültülmeye çalışılmıştır. Bu problemde, İHA Bİ'nin kapsama alanının en kenarında yer alan kullanıcıya dahi belli bir SGO değerini sağlayacak kalitede servis sunması hedeflenmiştir. Bu durumda İHA Bİ'nin konumu değiştiğinde, kapsama alanının en kenarında bulunan kullanıcı ile arasındaki mesafe ve RF yol kaybı değişeceği için İHA Bİ'nin RF gönderme gücünün değişmesi gerekecektir. Problem İHA Bİ'nin uçuş süresini enbüyültmeye çalıştığı için aslında arka planda bu RF gönderme gücünü küçültmeye çalışacaktır.

Eşitlik (45)'te İHA Bİ'den yayın alan kullanıcılar için SGO hesaplaması yapılmıştı. Bu formülden; İHA Bİ'nin RF gönderme gücü, İHA Bİ ve kullanıcıların anten kazançları ne kadar büyükse SGO'nun da kadar büyük olacağı ve İHA Bİ ile kullanıcı arasındaki RF yol kaybı ve gürültü gücü ne kadar büyükse SGO'nun da o kadar az olacağı görülmektedir.

Bu problemde kapsama alanının en kenarında bulunan kullanıcı SGO'su için bir alt eşik seviyesi tanımlanmaktadır:

$$\gamma = \frac{P_{TX} G_{Tx} G_{Rx}}{P_{loss} N_0 B} \geq \gamma_{min} \quad (50)$$

İHA Bİ'nin, bu kullanıcıya eşik seviyeden daha yüksek bir servis kalitesi sağlayabilmesi için RF gönderme gücünün aşağıdaki ifadeden daha büyük olması gerekecektir:

$$P_{TX} \geq \frac{\gamma_{min} P_{loss} N_0 B}{G_{Tx} G_{Rx}} \quad (51)$$

Formüle RF yol kaybı Eşitlik (38)'de ve alıcı anten kazançları, Eşitlikler (39), (40) ve (41)'de verildiği gibi daha açık bir şekilde yazılırsa RF gönderme gücü için aşağıdaki eşitsizlik elde edilir:

$$P_{TX} \geq \frac{\gamma_{min} 10^{\frac{1}{10} \left( \frac{\eta_{LoS,dB} - \eta_{NLoS,dB}}{1 + k \exp\left(-l\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_B}{2} - k\right)\right)} + \eta_{NLoS,dB} \right)} N_0 B c^2 h^2}{f^2 \cos^2\left(\frac{\theta_B}{2}\right) A_{et} A_{er}} \quad (52)$$

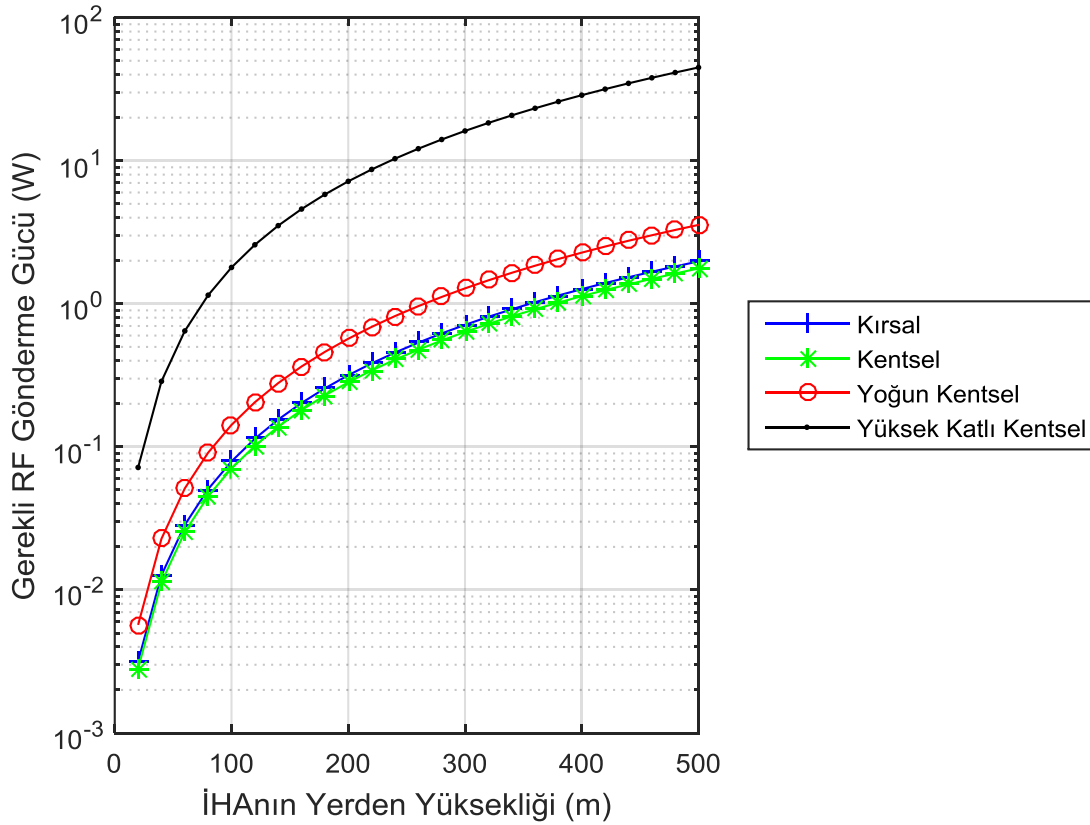
İlk senaryo iki alt senaryoya ayrılmıştır. İlkinde anten yarım-güç ışın genişliği sabit tutularak farklı çevre türleri için İHA Bİ yüksekliğine bağlı olarak gerekli RF güç seviyeleri hesaplanmış ve İHA Bİ operasyon süresi incelenmiştir. İkinci alt senaryoda ise kentsel çevre koşulu için İHA Bİ yüksekliği sabit tutularak anten yarım-güç ışın genişliği değişikliğine bağlı olarak RF güç seviyeleri ve İHA Bİ operasyon süresi incelenmiştir.

#### 4.2.1. Farklı Çevre Tiplerinin ve İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yüksekliğinin RF Gönderme Gücü Üzerine Etkisi

Bu alt senaryo kapsamında; İHA Bİ havada durma ve devre gücü sabit varsayılmış olup RF gönderme gücü İHA Bİ'nin yüksekliğine ve çevre tipine göre değişkenlik göstermektedir. İHA Bİ operasyon süresini enbüyütmek için İHA Bİ'nin harcadığı gücü enküçültmeye çalışmak gerekmektedir ve burada değişken kabul edilen tek güç RF gönderme gücü olduğu için bu güç enküçültülecektir. Bu alt senaryoda kapsama alanının en kenarında bulunan kullanıcıya bile belirli bir servis kalitesi sunulması hedeflendiği için bu değeri sağlayan en küçük RF gönderme gücü bulunmaya çalışılacaktır.

(52) numaralı eşitsizlik incelendiğinde bu hedefi sağlayan en küçük RF gönderme gücünün eşitsizlikte verilen minimum değere eşit olduğu görülmektedir. Bu değerden daha yüksek sinyal seviyesi ile yayın yapmak kullanıcı için gerekli servis kalitesinin daha üstünü sağlamaya yarayacaktır ancak problemde amaç İHA Bİ operasyon süresini artırmak olduğu için gücü verimli kullanmak adına eşik SGO'yu sağlamak yeterli kabul edilmiştir.

Farklı çevre tipleri için yüksekliğe bağlı olarak gerekli en küçük RF gönderme gücü grafiği Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3. Gerekli En Küçük RF Gönderme Gücünün Farklı Çevre Tiplerine ve İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi

Grafikten görülebileceği üzere İHA Bİ yüksekliği arttıkça gerekli RF gönderme gücü artmaktadır. Bunun nedeni alıcı ile verici antenler arası mesafe arttıkça RF yol kaybının artmasıdır. Bu nedenle kullanıcılara istenen minimum SGO seviyesinde servis kalitesi sağlayabilmek için İHA Bİ yüksekliği arttıkça daha fazla baz istasyonunun RF gönderme

gücünü artırması gerekmektedir. Grafikte ayrıca farklı çevre tiplerinin gerekli RF gönderme gücü üzerine etkileri de gözlenmektedir. Görüleceği üzere en fazla RF gönderme gücüne ihtiyaç duyan çevre tipi yüksek katlı kentsel, sonrasında ise sırasıyla yoğun kentsel, kentsel ve kırsal çevre türleridir. Kısım 3.2. Kanal Modellemesi'nde de anlatıldığı üzere farklı çevre tiplerinde İHA baz istasyonu ile yerdeki kullanıcı arası RF haberleşmede doğrudan RF yol olabileceği gibi, binalardan yansıyan veya kırılan RF dalgalar ile de haberleşme olabilmektedir ve bu ikinci tür haberleşmede olasılıksal yol kaybı daha fazla olmaktadır. Yüksek katlı kentsel çevre tipinde binalardan kırılan ve yansıyan dalgalar daha fazla olurken, kırsal çevre tipinde ise doğrudan görüş hattı bulunma olasılığı daha yüksektir ve bu nedenle yüksek katlı kentsel çevre tipinde RF yol kaybı kırsal çevre tipine göre daha fazla olmaktadır.

Grafikten ayrıca kırsal, kentsel ve yoğun kentsel çevre tiplerinde İHA Bİ yüksekliği 500 metreye ulaştığı durumda 5 Watt'tan daha az bir RF gönderme gücünün kullanıcılar için istenen servis kalitesini sağlamaya yettiği görülmektedir. Ancak yüksek katlı kentsel çevre tipinde yoğun RF kaybı nedeniyle İHA Bİ yüksekliği 500 metreye çıktığında gerekli RF gönderme gücü de 45 Watt mertebelerine çıkmaktadır.

Kısım 4.2. İHA Uçuş Dinamiklerinin İncelenmesi altında gösterilecek olan havada durma gücü değerleri Şekil 4.3'te verilmekte olan RF gönderme gücü değerlerine kıyasla çok büyüktür. Bu nedenle RF gönderme gücü, havada durma gücü yanında ihmal edilebilir kalmaktadır ve İHA Bİ operasyon süresine etkisi de önemsiz kabul edilebilecek seviyededir. Ancak literatürdeki çalışmalar incelendiğinde RF gönderme gücünü enküçültmek gibi hedefler içermektedir. Bu, İHA Bİ yerleşiminde yanlış yönde uğraş verildiğini göstermektedir.

Ancak yine de problemi RF gönderme gücünü enküçültmeyi hedefleyen şekilde modellemek istersek şu şekilde ifade edebiliriz:

$$T_{op}(h) = \frac{\frac{60}{1000} N_{bat} VC}{\frac{1}{10} \left( \frac{\eta_{LoS,dB} - \eta_{NLoS,dB}}{1 + k \exp\left(-l\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_B}{2} - k\right)\right)} + \eta_{NLoS,dB} \right) N_0 B c^2 h^2} \quad (53)$$

$$P_H + P_{cir} + \frac{\gamma_{min} 10}{f^2 \cos^2\left(\frac{\theta_B}{2}\right) A_{et} A_{er}}$$

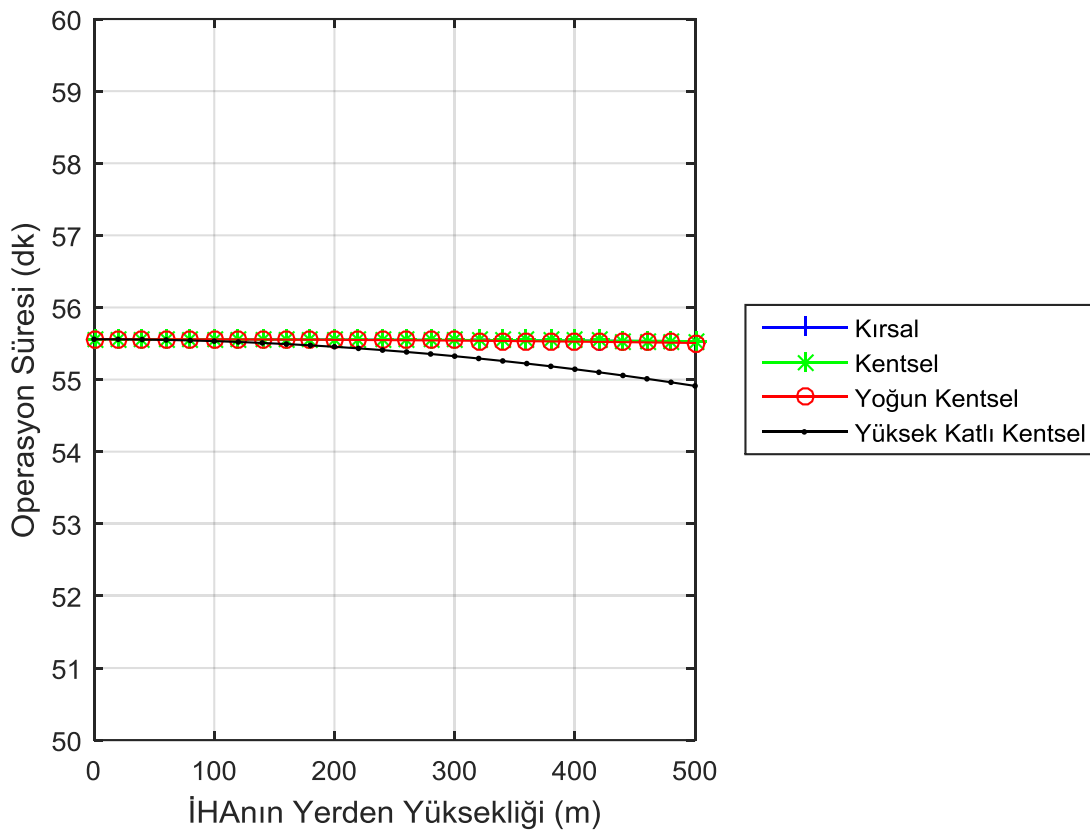


$$P_H = 3800W \quad (54)$$

$$P_{cir} = 10W \quad (55)$$

Tipik olarak rotorların çektiği güç 3800 Watt ve devrenin çektiği güç 10 Watt'tır.

Bu problem için çizdirilmiş olan yüksekliğe bağlı operasyon süresi grafiği Şekil 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.4. İHA Bİ Operasyon Süresinin Farklı Çevre Tiplerine ve İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi

Şekil 4.4'te gösterildiği üzere RF gönderme gücü üzerinden optimizasyon yapılmaya çalışıldığında İHA Bİ yüksekliği yerden 500 metreye çıktığı durumda kırsal, kentsel ve yoğun kentsel çevre tiplerinde operasyon süresindeki değişim sıfıra yakın iken, bu durum yüksek katlı kentsel çevre tipinde yarım dakika mertebelerindedir. İlk üç çevre tipi için RF gönderme gücünü optimize etmenin İHA Bİ çalışma süresi bakımından ihmal edilebilir olduğu görülmektedir.

Her ne kadar problemin yararsız olduğu gösterilmiş olsa da problem formülasyonunun eksik kalmaması için gerekli kısıtlar tanımlanmalıdır. Formül (53)'ten anlaşılacağı üzere yüksekliğin artması RF yol kaybının artmasına neden olacağından dolayı; RF gönderme gücünü artırmakta ve İHA Bİ operasyon süresini azaltmaktadır. Bu nedenle herhangi bir alt kısıt koymadan bu süreyi enbüyülmeye çalıştığımızda problem çözümü İHA Bİ'nin yerde kalması olacaktır. Bu nedenle probleme en küçük kapsama alanının yarıçapı şeklinde bir sınır koyulabilir:

$$r \geq r_{min} \quad (56)$$

Bu kısıtı problemin değişkeni olan  $h$  cinsinden ifade etmek istersek Şekil 1.7'de verilen görselden faydalanabiliriz. Bu görsel incelendiğinde  $r$  ile  $h$  arasında  $\frac{\theta_B}{2}$  açısına bağlı geometrik bir ilişki olduğu görülür. İlişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$h \geq h_{min} = \frac{r_{min}}{\tan(\frac{\theta_B}{2})} \quad (57)$$

Ayrıca problemde  $P_{cir}$  ve  $P_H$ 'in sabit olması da kısıt şeklinde ifade edilebilir.

Problemin kısıtları ile beraber formülasyonu aşağıda verilmektedir:

$$\text{Enbüyült} \quad T_{op}(h) = \frac{\frac{60}{1000} N_{bat} V C}{\frac{1}{10} \left( \frac{\eta_{LoS,dB} - \eta_{NLoS,dB}}{1 + k \exp\left(-l\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_B}{2} - k\right)\right)} + \eta_{NLoS,dB} \right)} \quad (58)$$

$$\frac{P_H + P_{cir} + \gamma_{min}^{10}}{f^2 \cos^2\left(\frac{\theta_B}{2}\right) A_{et} A_{er}} N_0 B c^2 h^2$$

Kısıtlar

$$h \geq h_{min} = \frac{r_{min}}{\tan(\frac{\theta_B}{2})} \quad (59)$$

$$P_H = 3800W \quad (60)$$

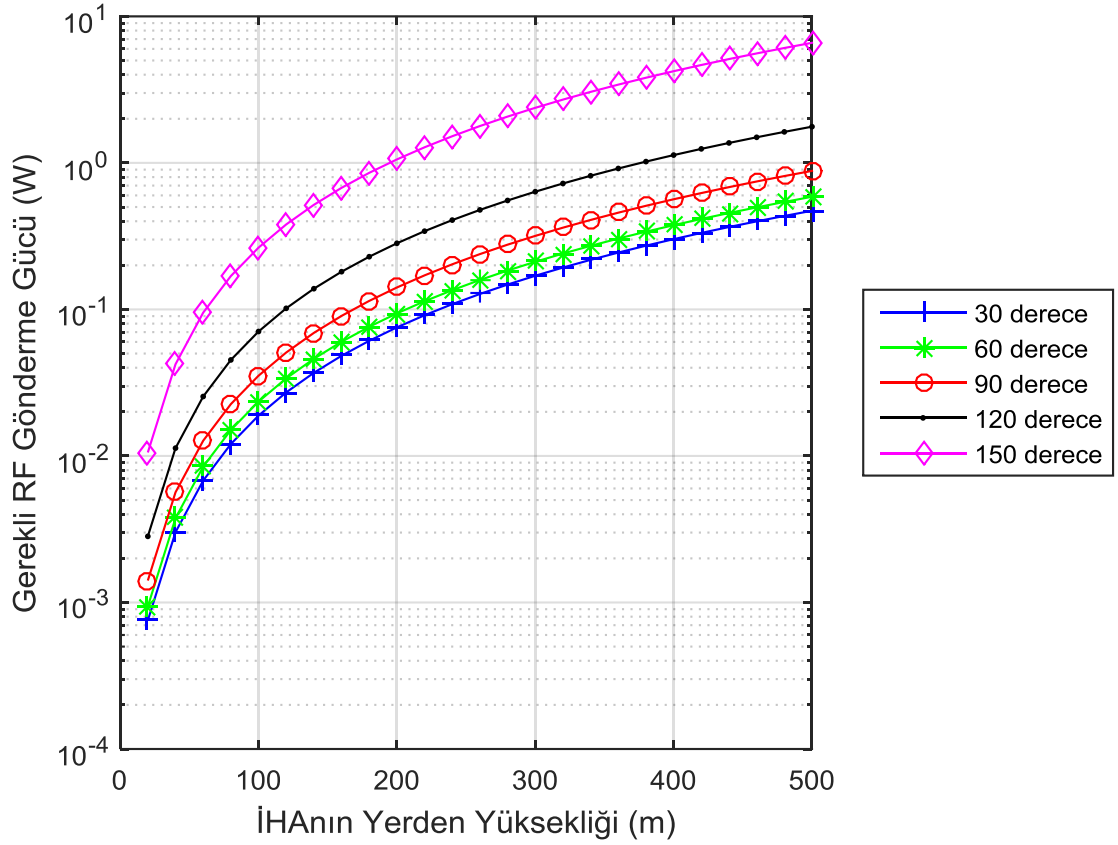
$$P_{cir} = 10W \quad (61)$$

Kapsama alanı için yarıçap sınırını 210 metre almak istersek, problem formülasyonuna göre İHA Bİ yerleşim sonucu yaklaşık olarak 120 metre yükseklikte çıkmaktadır. Operasyon süresi de 55.5 dakika olmaktadır.

#### **4.2.2. Anten Yarım-Güç Işın Genişliğinin RF Gönderme Gücü Üzerine Etkisi**

RF gönderme gücüne ilişkin ikinci alt senaryoda İHA Bİ'nin kentsel çevre tipinde servis verdiği durumda İHA Bİ anteninin yarım-güç ışın genişliğinin ve İHA Bİ yüksekliğinin RF gönderme gücüne etkisi incelenmektedir. Bu senaryoda da, bir öncekinde olduğu gibi kapsama alanının en kenarında bulunmakta olan kullanıcıya bile belirlenmiş olan servis kalitesinin sağlanması hedeflenmiştir.

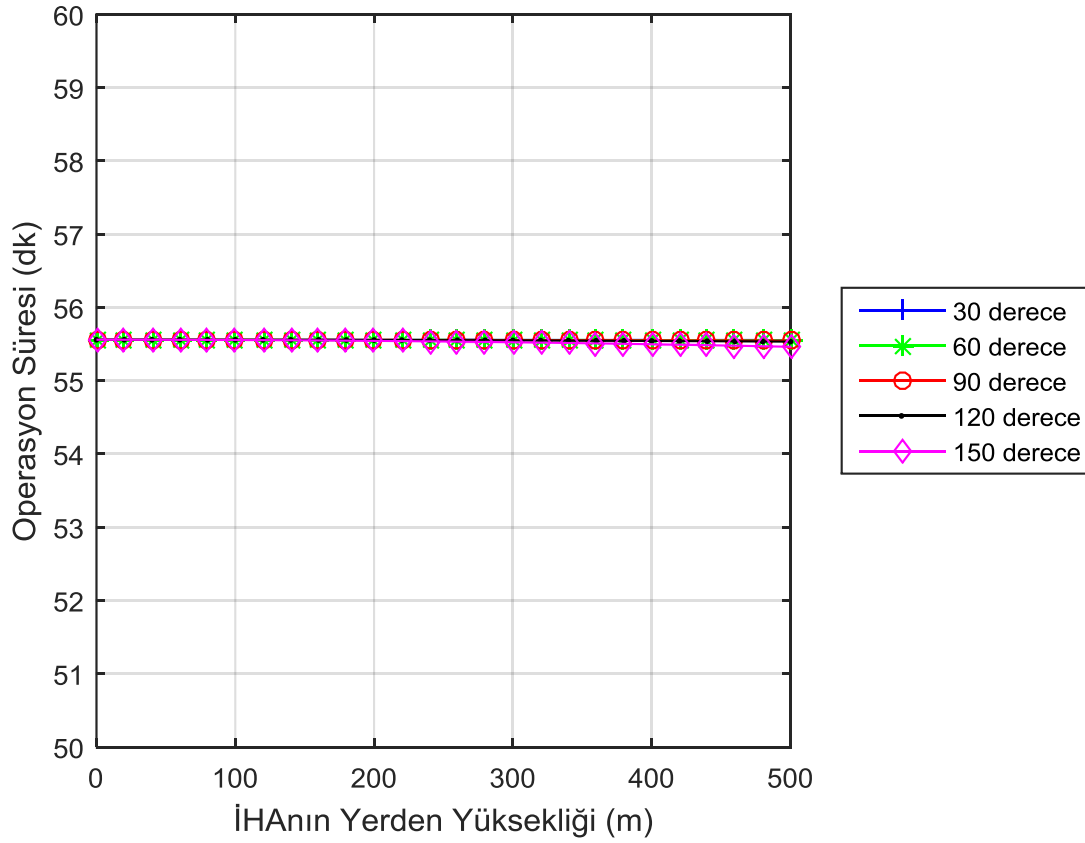
Şekil 4.5'te bu senaryo için gerekli RF gönderme gücü grafiği gösterilmektedir. Grafikte farklı renk ve desene sahip çizgiler antenin farklı yarım-güç ışın genişliğine sahip olduğu durumlar için çizdirilmiştir. Anten yarım-güç ışın genişlikleri tipik olarak  $60^{\circ}$ - $120^{\circ}$  arasındadır. Bu çalışmada ise fikir vermesi açısından  $30^{\circ}$  ve  $150^{\circ}$  için de grafik çizdirilmiştir. Görüleceği üzere yarım-güç ışın genişliği arttıkça, aynı servis kalitesini verebilmek için gereken RF gönderme gücü artmaktadır. Bunun nedeni, aynı yükseklikte iken yarım-güç ışın genişliğinin artması durumunda kapsama alanının en kenarındaki kullanıcı ile olan mesafenin artması, buna bağlı olarak da RF yol kaybının artmasıdır.



Şekil 4.5. Gerekli En Küçük RF Gönderme Gücünün İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi

Grafikten görüleceği üzere İHA Bİ'nin yüksekliği 0'dan 500 metreye çıkarken, 30° yarı-güç ışın genişliğine sahip bir anten için 1 Watt'tan daha az bir RF gönderme gücü ile kullanıcılara istenen servis kalitesi verilebilirken, 150° yarı-güç ışın genişliğine sahip bir anten için 6.5 Watt civarı bir güç gerekmektedir.

Bu durumun İHA Bİ operasyon süresine etkisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Bahsedilen RF güç, havada durma gücüne (3800 Watt) kıyasla ihmal edilebilir bir seviyede olması nedeniyle operasyon süresine etkisi yarım dakikadan az olmaktadır.



Şekil 4.6. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi

#### 4.3. İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Uçuş Dinamiklerinin İncelenmesi

İkinci senaryoda İHA Bİ'nin devre ve RF gönderme güçlerinin sabit kabul edildiği, yükseklikten sadece havada durma gücünün etkilendiği varsayılmaktadır. Bu başlık altında İHA Bİ tasarım parametreleri tek tek ele alınmakta ve bunların İHA Bİ havada kalma gücüne ve operasyon süresine etkileri incelenmektedir. Ele alınan tasarım parametreleri sırası ile toplam kütle, pervane yarıçapı, rotor sayısı, kanatçık sayısı ve batarya sayısıdır. Bu parametrelerin havada durma gücüne etkisi (28) numaralı formülde şu şekilde verilmektedir:

$$P_H = \frac{((m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat}m_{bat})g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\pi R^2 N_{rotor} \rho_0 \exp(-u_0(h_c + h))}} \left(1 + \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3}\right) \quad (28)$$

Aynı parametrelerin İHA operasyon süresine etkisi ise aşağıdaki şekilde olmaktadır.

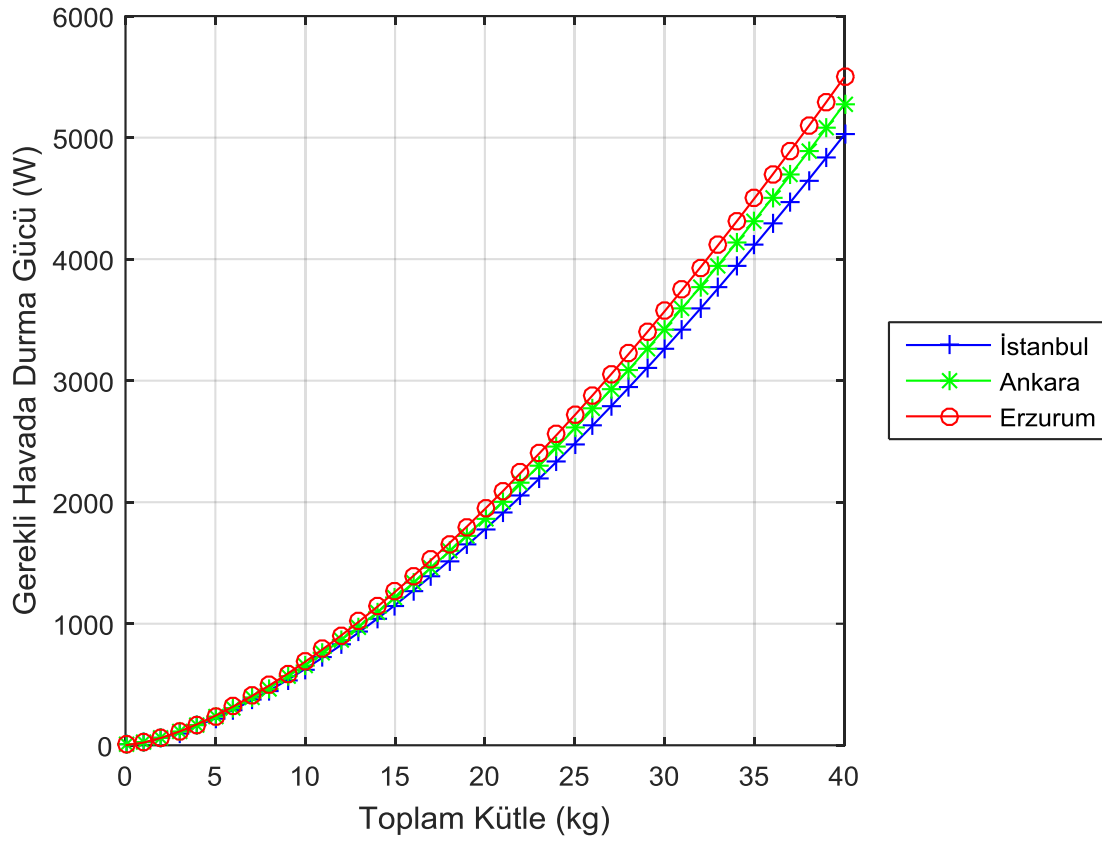
$$T_{op} = \frac{\frac{60}{1000} N_{bat} VC}{\frac{(m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat} m_{bat}) g^2}{\sqrt{2\pi R^2 N_{rotor} \rho_0 \exp(-u_0(h_c + h))}} \left(1 + \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R J^3}\right) + P_{cir} + P_{TX}} \quad (62)$$

Bu senaryoda devre gücü ve RF gönderme gücü 10 Watt olarak hesaba katılmaktadır.

İHA tasarım parametreleri aşağıdaki başlıklarda detaylı olarak incelenmektedir. Bu başlık altında havada durma gücünün İHA Bİ yüksekliğine göre grafiği bulunmamaktadır, bunun nedeni bu grafiğin, RF güç havada durma gücüne kıyasla çok küçük olduğu için üçüncü senaryoda çizdirilecek olan grafikler ile aynı çıkmasıdır. Bu nedenle yüksekliğe bağlı değişim üçüncü senaryo altında incelenecektir. Ancak yüksekliğin etkisinin gösterilmesi için bu başlık altındaki çalışmalar, farklı rakımlardaki şehirler için ayrı ayrı çizdirilmiştir.

#### 4.3.1. Toplam İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Kütlesi

Toplam İHA Bİ kütlesi; İHA'nın kendi kütlesi, baz istasyonu kütlesi ve bataryaların kütlesinin toplamından oluşmaktadır. Toplam İHA Bİ kütlesi Eşitlik (28)'de verildiği üzere havada durma gücünü artıran bir etkidir. Kütle dışında diğer İHA Bİ parametrelerinin Çizelge 4.1'de verildiği şekilde hesaba alınması durumunda, İstanbul, Ankara ve Erzurum'da 120 metre yükseklikte görev yapan İHA Bİ'nin Havada Durma Gücü – Toplam Kütle grafiği Şekil 4.7'de verilmektedir.

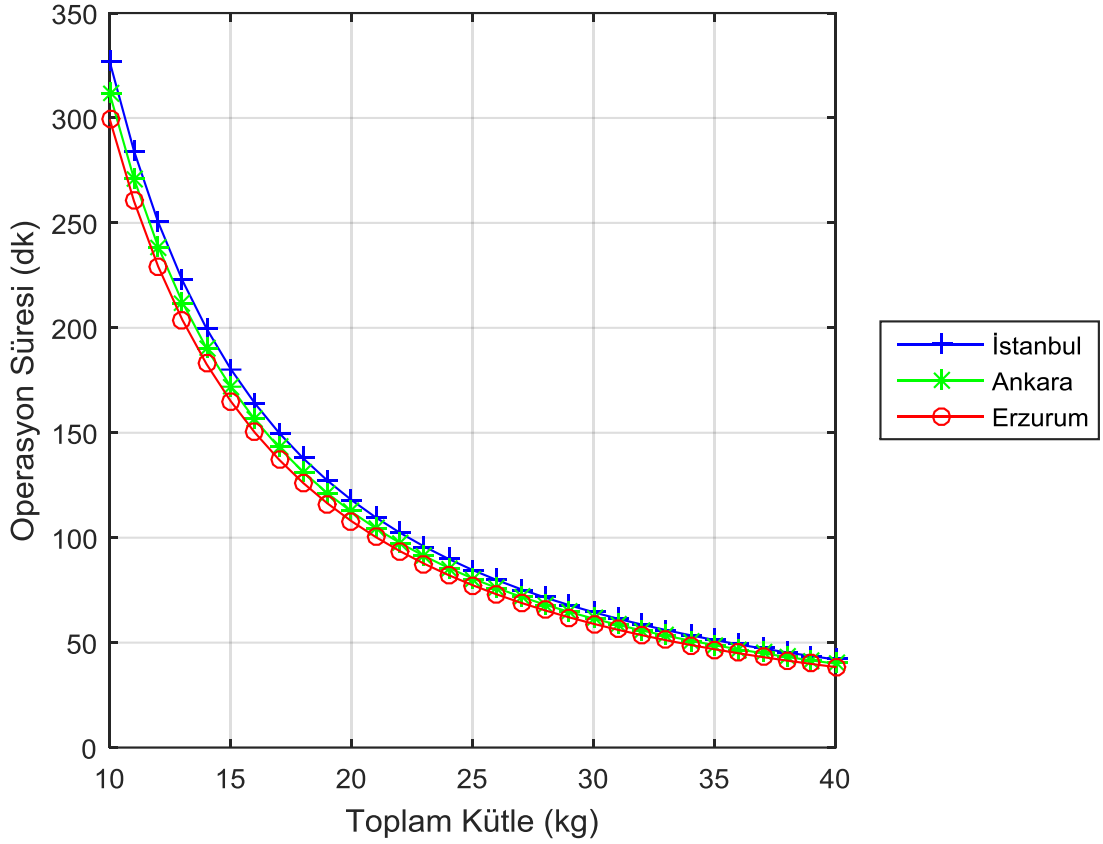


Şekil 4.7. Gerekli Havada Durma Gücü – Toplam Kütle Grafiği

Verilen üç şehir içinde rakımı en fazla olan Erzurum’da gerekli olan havada durma gücü en yüksektir. Bunun nedeni rakım arttıkça hava yoğunluğunun azalması ve İHA’nın aynı yükseklikte kalabilmek için pervaneleri aracılığıyla az miktarda olan bu havayı daha fazla bir hız ile aşağı doğru itmek zorunda kalmasıdır.

Grafikte kütlenin havada durma gücüne etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Eşitlik (28)’de bu ilişki havada durma gücünün kütlenin  $3/2$ ’inci kuvveti ile artmakta olduğunu göstermektedir. Bu nedenle kütlenin 2 katına çıkması, gerekli havada durma gücünün de  $2^{(3/2)} = 2.83$  katına çıkmasına neden olacaktır. Toplam kütle 20 kg’dan 40 kg’a çıktığında, güç de İstanbul, Ankara ve Erzurum için sırası ile 1776, 1865 ve 1943 Watt’tan 5023, 5275 ve 5497 Watt’a çıkmaktadır. Grafikte her üç şehrin havada durma güç değerleri yakın gibi görünse de aralarında 20 kg toplam kütlede 100’er Watt, 40 kg toplam kütlede ise 200’er Watt fark bulunmaktadır ve bu değerler RF güce kıyasla çok büyüktür ve operasyon süresi için çok önemlidir.

Şekil 4.8’de toplam İHA Bİ kütlesinin İHA Bİ operasyon süresi üzerine olan etkisi gösterilmektedir.



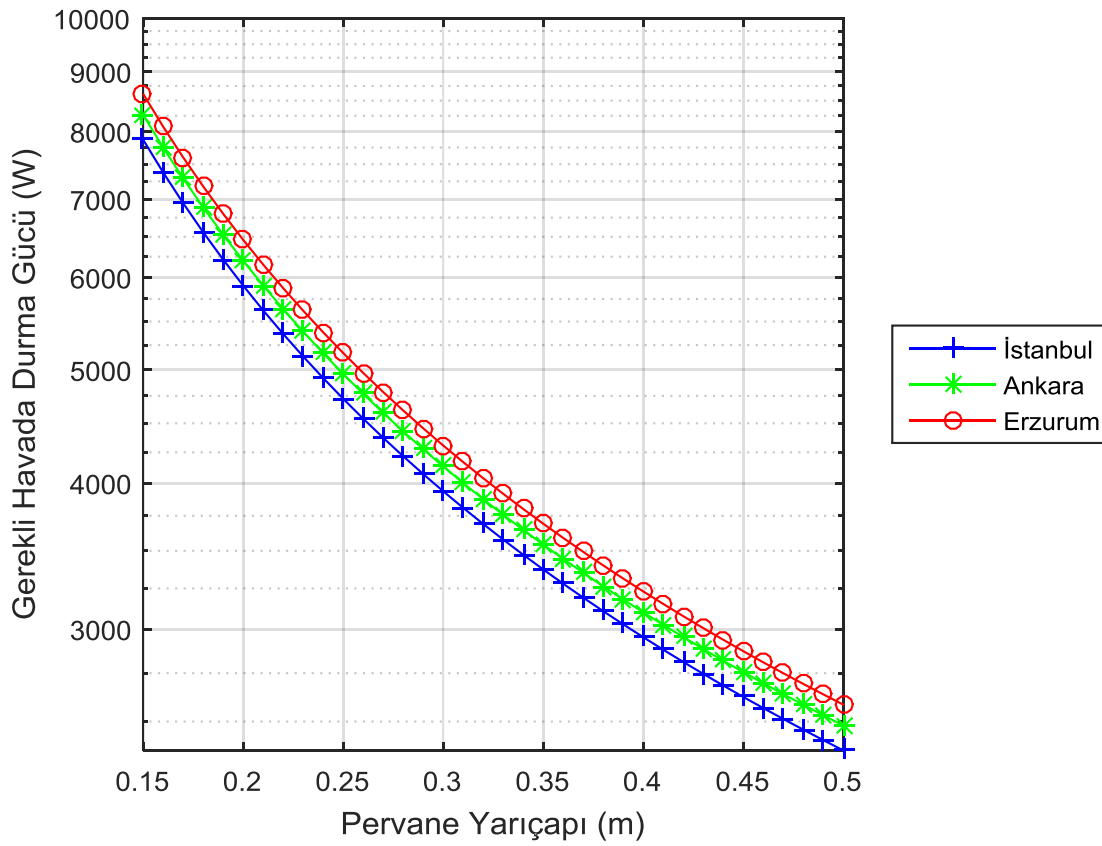
Şekil 4.8. Operasyon Süresi – Toplam Kütlesine Grafiği

Havada durma gücü, genellikle 10 Watt’lar mertebesinde olan RF gönderme gücüne kıyasla çok daha fazladır ve bu nedenle İHA Bİ’lerin servis sürelerini uzatmak için göz önünde bulundurulması gerektiği görülmektedir. İHA Bİ tasarımında kütleyi az tutmaya çalışmak havada durma gücünü azaltacaktır ancak kütleyi azaltmak demek aynı zamanda daha az batarya taşıyabilmek ve İHA boyutunu küçültmek anlamına da gelmektedir. Daha az batarya taşınması durumunda İHA enerjisi de azalacaktır. İHA boyutunu küçültmek ise rotor sayısı, pervane yarıçapı gibi parametrelerin de değişmesine neden olabilecektir. Bu nedenle toplam İHA kütlesini azaltma çalışması diğer İHA tasarım parametreleri ile beraber değerlendirilmelidir.



#### 4.3.2. Pervane Yarıçapı

Pervane yarıçapı havada durma gücü üzerinde önemli etkisi olan bir parametredir. (28) numaralı formülde yarıçapın artması durumunda havada durma gücünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca pervane kanatçık genişliği de pervane yarıçapı ile ilişkilidir. Bu çalışmada kanatçık genişliği pervane yarıçapının %30'u kabul edilmektedir. Pervane yarıçapı ile havada durma gücü aralarındaki ilişki Şekil 4.7'de verilmektedir. Şekil 4.9'da pervane yarıçapı ve kanatçık genişliği dışında diğer İHA Bİ parametreler Çizelge 4.1'de verildiği şekilde hesaba alınmış ve grafik, İHA Bİ'nin İstanbul, Ankara ve Erzurum şehirlerinde 120 metre yükseklikte görev yaptığı üç farklı durum için çizdirilmiştir.

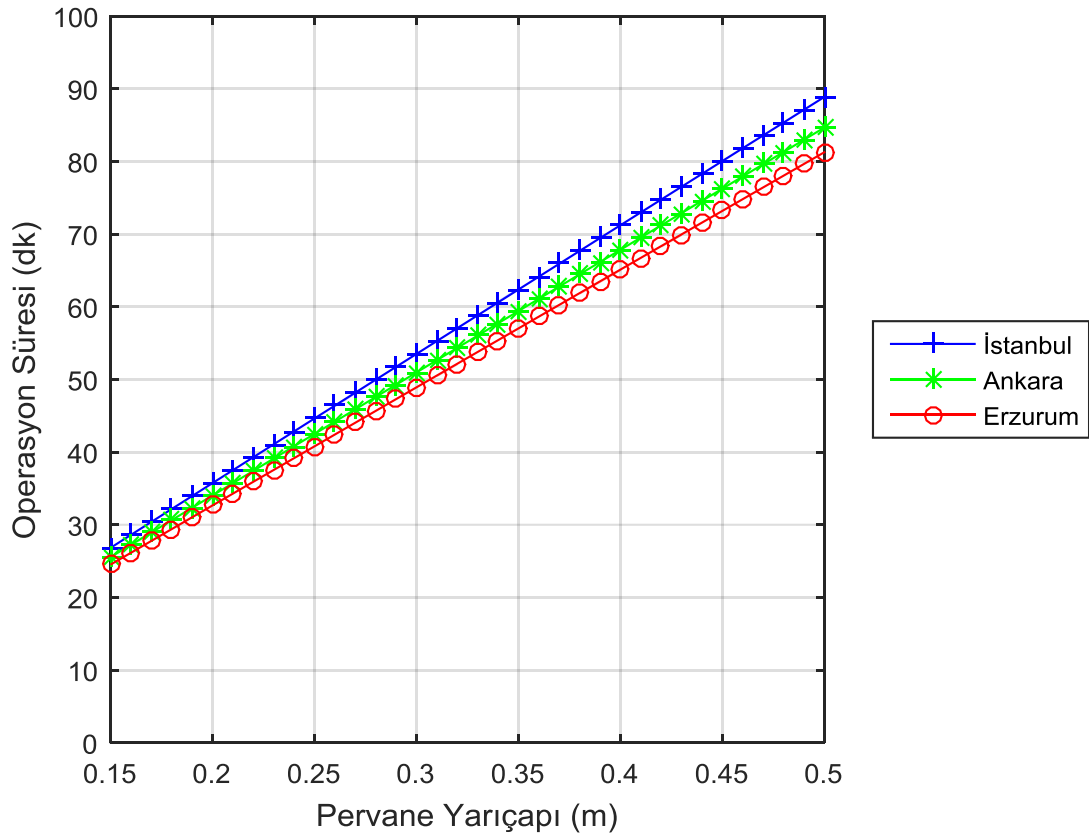


Şekil 4.9. Gerekli Havada Durma Gücü – Pervane Yarıçapı Grafiği

Bu grafikte pervane yarıçapı 15 cm iken gerekli gücün 7800-8800 Watt aralığında, 50 cm civarında iken ise 2200-2800 Watt aralığında olduğu görülmektedir. İHA Bİ tasarımında pervane yarıçapının büyük tutulması gerekli toplam gücü azaltacaktır. Ancak 4.3.1. Toplam İHA Kütlesi başlığında da belirtildiği gibi, bir parametrenin değiştirilmesi, diğer

parametreleri de dolaylı yoldan etkilemektedir. Örneğin pervane yarıçapını artırmak İHA boyutunun büyümesine ve toplam kütlenin artmasına sebep olacaktır ancak pervane malzemeleri hafif olduğu için (karbon fiber vb.) bu ağırlık artışı çok da fazla olmayacaktır. Bunun dışında pervane yarıçapının artırılması daha kuvvetli rotor kullanımı gerekebileceği için ağırlık artabilir. Pervane yarıçapının artması durumunda toplam kütle artışı Şekil 4.9’da dikkate alınmamıştır.

Şekil 4.10’da pervane yarıçapının İHA Bİ operasyon süresine etkisi gösterilmektedir. Bir önceki grafikten de beklendiği üzere pervane yarıçapı arttığında gerekli havada durma gücü azaldığı için İHA Bİ operasyon süresi artmaktadır.

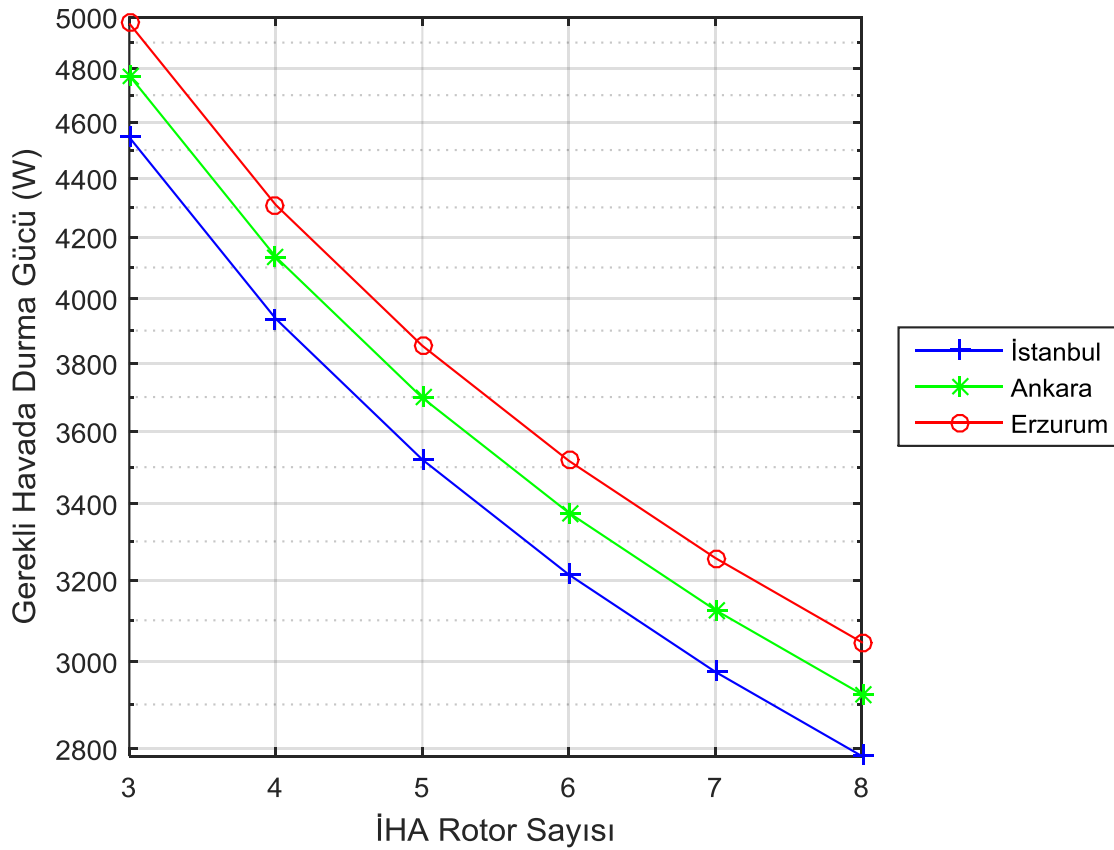


Şekil 4.10. Operasyon Süresi – Pervane Yarıçapı Grafiği

Pervane yarıçapının 15 cm olduğu durumda operasyon süresi farklı şehirler için 20-30 dakika arası iken, yarıçapın 50 cm olduğu durumda bu süreler 80 ile 90 dakika arasında olduğu görülmektedir.

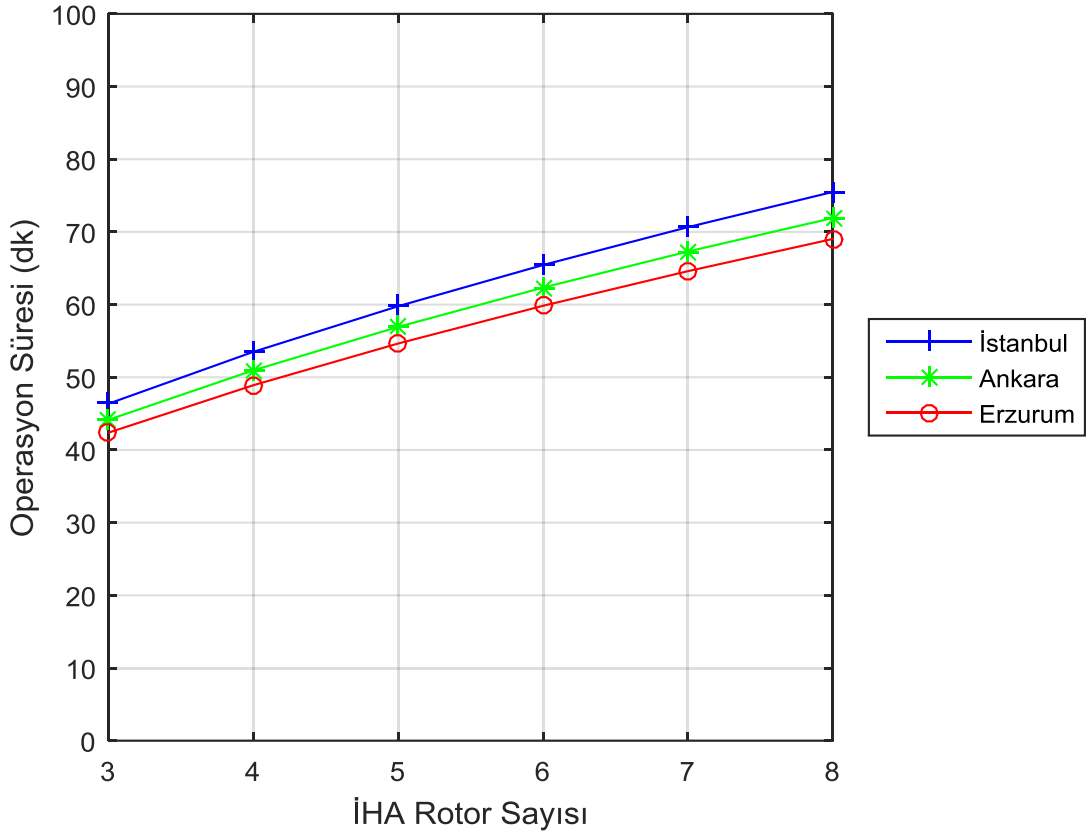
#### 4.3.3. İnsansız Hava Aracı Rotor Sayısı

(28) numaralı formül incelendiğinde, havada durma gücünün İHA rotor sayısının karekökü ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu durumda İHA rotor sayısının 2 katına çıkması halinde gerekli havada durma gücü  $\sqrt{2} = 1.41$  oranında azalacaktır. Bu ilişki Şekil 4.11’de gösterilmektedir. İlgili grafikte İHA rotor sayısı dışında diğer İHA Bİ parametreleri Çizelge 4.1’de verildiği şekilde hesaba alınmış ve grafik, İHA Bİ’nin İstanbul, Ankara ve Erzurum şehirlerinde 120 metre yükseklikte görev yaptığı üç farklı durum için çizdirilmiştir. Rotor sayısının artması durumunda toplam kütle artışı grafiklerde gösterilmemiştir. Tipik İHA’larda rotor ağırlıkları 100-200 gram mertebelerindedir. Şekil 4.11 toplam kütlesi 34 kg olan bir İHA Bİ için çizdirilmiş olup rotor sayısının 3’ten 8’e çıkması kütlede en fazla 1 kg artışa sebep olacak olup bu değer toplam İHA Bİ kütlesine kıyaslandığında %5’in altında kaldığı için ihmal edilmiştir.



Şekil 4.11. Gerekli Havada Durma Gücü – İHA Rotor Sayısı Grafiği

Şekil 4.12’de İHA rotor sayısı ile İHA operasyon süresi arasındaki ilişki gösterilmektedir.

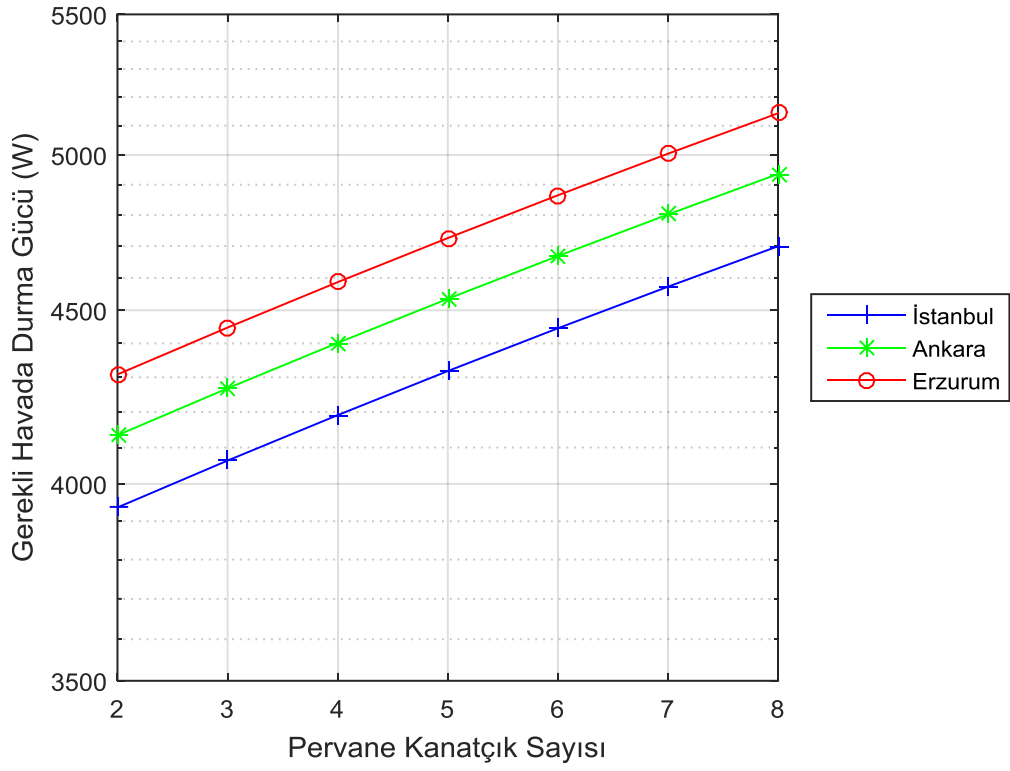


Şekil 4.12. Operasyon Süresi – İHA Rotor Sayısı Grafiği

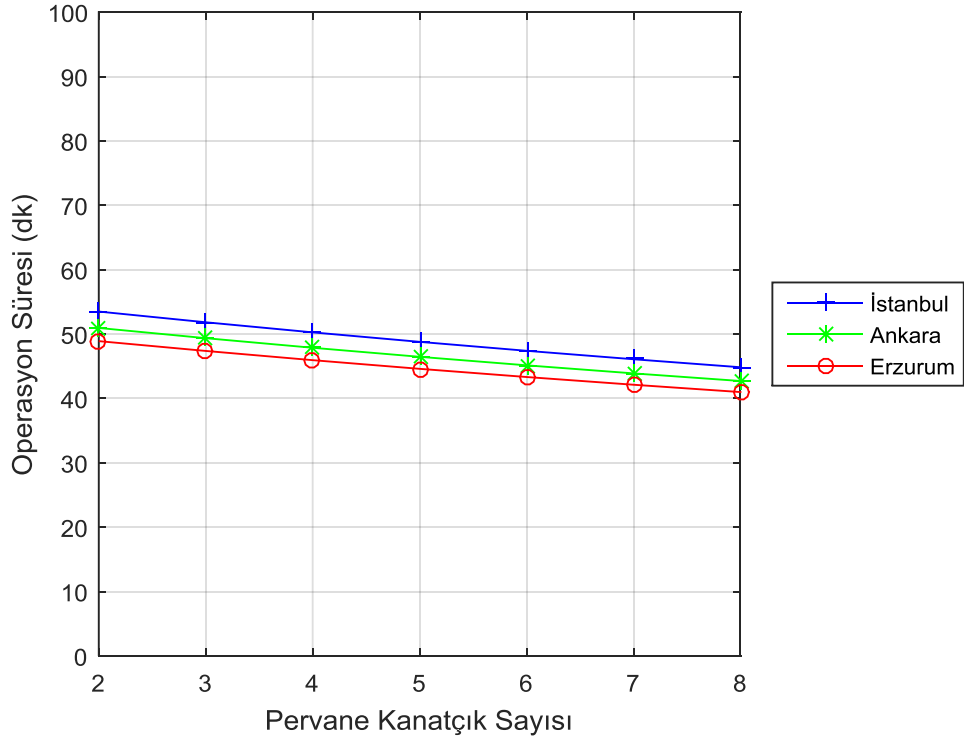
#### 4.3.4. Pervane Kanatçık Sayısı

Pervane kanatçık sayısı ile havada durma gücü ve İHA Bİ operasyon süresi arasındaki ilişki sırası ile Şekil 4.13 ve 4.14’te verilmektedir.

Eşitlik (28)’de de görülebileceği üzere pervane kanatçık sayısının artışı, gerekli havada durma gücünün artmasına neden olmaktadır. Şekil 4.13’te 2’den 8’e çıkan pervane sayısının, havada durma gücünü 3900-4300 Watt aralığından 4700-5200 Watt aralığına çıkardığı görülmektedir. Bu durumun İHA Bİ operasyon süresi üzerindeki etkisi 8-9 dakikalık bir değişime denk gelmektedir.



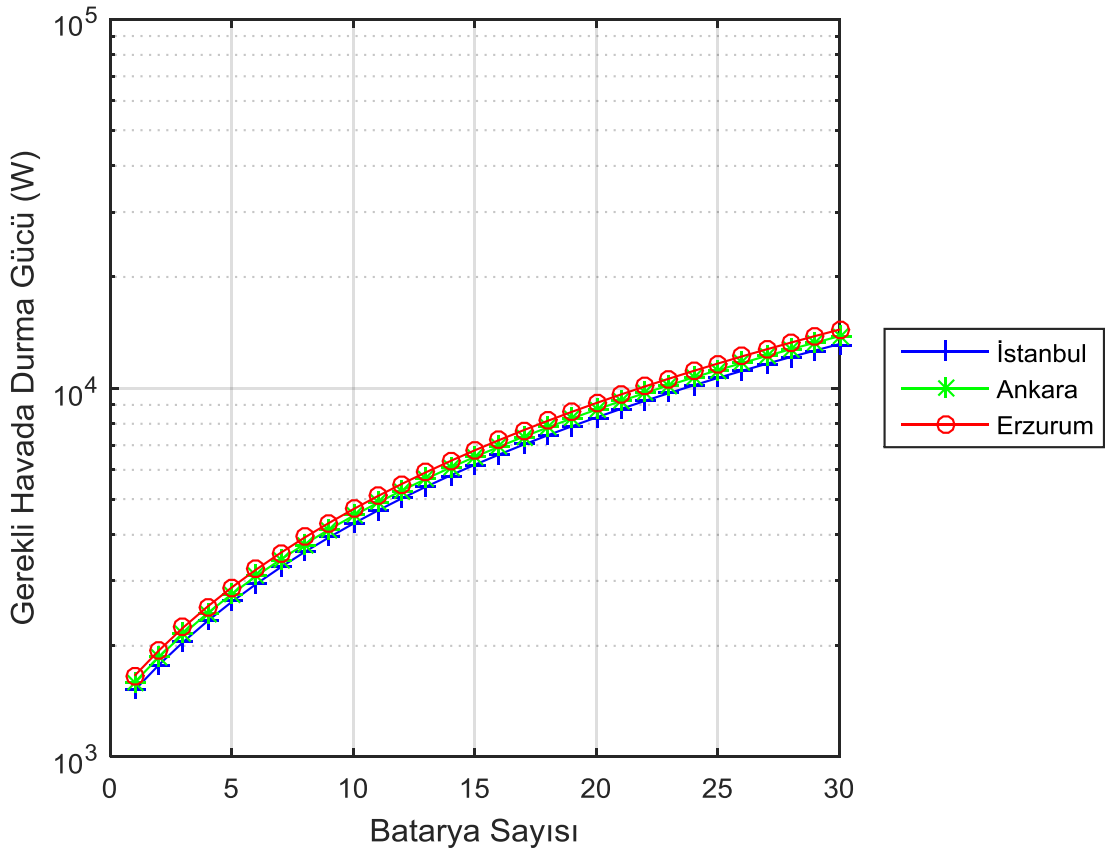
Şekil 4.13. Gerekli Havada Durma Gücü – Pervane Kanatçık Sayısı Grafiği



Şekil 4.14. Operasyon Süresi – Pervane Kanatçık Sayısı Grafiği

#### 4.3.5. İnsansız Hava Aracı Batarya Sayısı

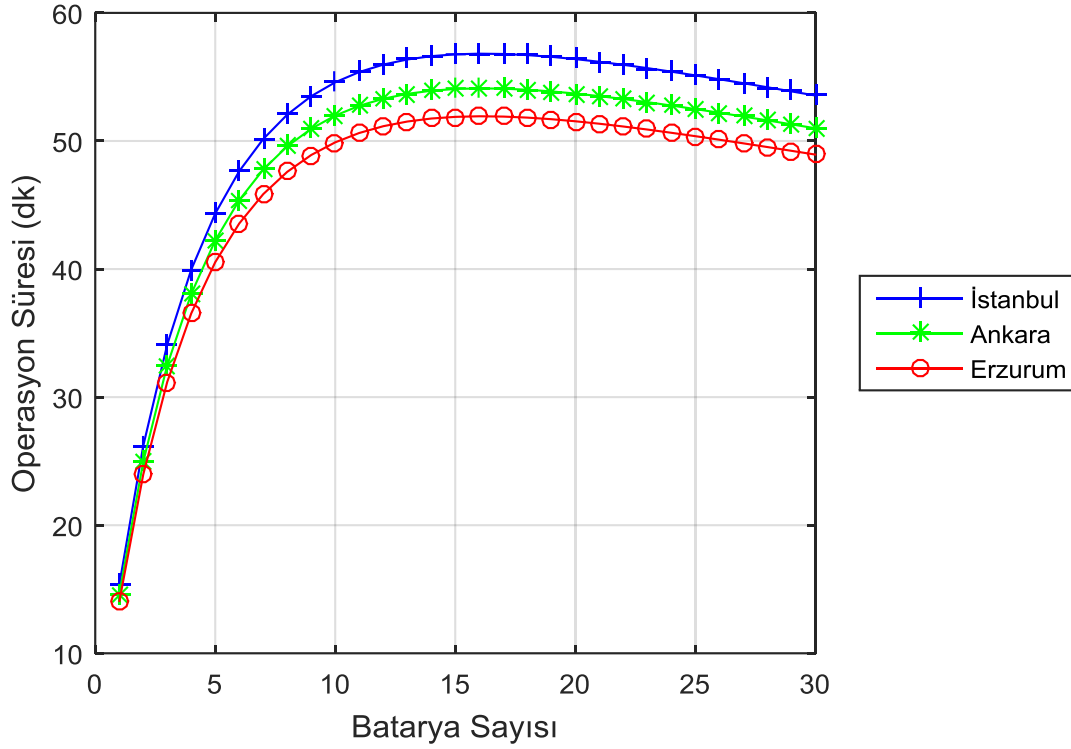
İHA Bİ tasarımına ilişkin olarak son incelenecek olan parametre batarya sayısıdır. Batarya sayısı artışı İHA Bİ'nin enerjisini artırmakla birlikte, toplam İHA Bİ kütlesinin de artışına sebep olmaktadır. Bu durumun etkisini incelemek için Şekil 4.15'te Havada Durma Gücü – Batarya Sayısı grafiği verilmektedir. Grafik batarya sayısının 1'den 30'a kadar arttığı durum için hazırlanmıştır, batarya sayısının her 1 adet artışı toplam İHA Bİ kütlesinin 2 kg artışına neden olmaktadır. Bu nedenle grafik, toplam İHA Bİ kütlesinin havada durma gücüne etkisini inceleyen Şekil 4.7 ile aynı mantığa sahiptir. 1 adet batarya olması durumunda toplam kütle 18 kg iken, 30 adet batarya olması durumunda toplam kütle 76 kg olmaktadır ve bu da yaklaşık olarak 14000 Watt civarı bir havada durma gücü gerektirmektedir.



Şekil 4.15. Havada Durma Gücü – Batarya Sayısı Grafiği

Batarya sayısının İHA Bİ operasyon süresine etkisi Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Grafikte batarya sayısı artışının belirli bir noktaya kadar operasyon süresini olumlu

etkilediği, ancak belli bir noktadan sonra operasyon süresinin negatif etkilendiği görülmektedir. Bunun nedeni; batarya sayısındaki artışın İHA Bİ enerjisini doğrusal oranda artırması, ancak artan İHA Bİ toplam kütesinin gerekli havada durma gücünü  $(3/2)$ 'inci kuvvet ile artırmasıdır. Bu nedenle belli bir noktaya kadar İHA Bİ enerjisi gerekli havada durma gücüne kıyasla daha fazla artmakta iken, belli bir noktadan sonra havada kalma gücünün artışı daha fazla olmaktadır.



Şekil 4.16. Operasyon Süresi – Batarya Sayısı Grafiği

#### 4.4. RF Gönderme Gücü ve Havada Durma Gücü Göz Önüne Alınarak İnsansız Hava Aracı Baz İstasyonu Yerleşimi

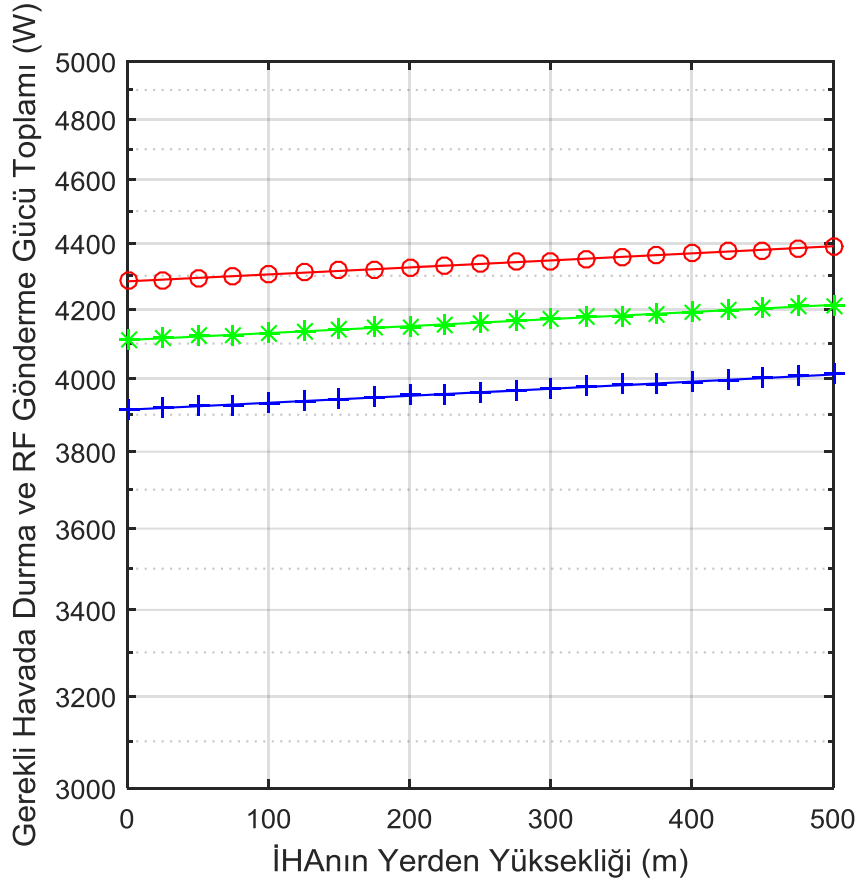
Üçüncü senaryo ilk iki senaryonun birleştirilmiş versiyonudur; bu senaryoda sadece devre gücü sabit alınmakta olup havada durma gücü ve RF gönderme gücü İHA Bİ yüksekliğine göre değişmektedir.

Üçüncü senaryo da kendi içinde iki alt senaryoya bölünmüştür. İlkinde RF gönderme gücü ve havada durma gücü üzerinde herhangi bir üst kısıt konulmamış olup yüksekliğe

bağlı olarak her ikisi de değişmektedir. İkinci alt senaryoda ise RF gönderme gücü üzerinde bir üst sınır belirlenmiş olup kullanıcılar için farklı SGO seviyelerine göre İHA Bİ yükseklikleri incelenmektedir.

#### 4.4.1. RF Gönderme Gücü ve Havada Durma Gücü Üzerinde Üst Sınır Olmama Durumunun İncelenmesi

Bu alt senaryoda İHA Bİ yüksekliği arttıkça gerekli olan RF gönderme gücü ve havada durma gücü de artmaktadır ve bu güçler için bir üst sınır belirlenmemiştir. Bu durum için yüksekliğe bağlı toplam gerekli güç grafiği Şekil 4.17’de verilmektedir. Burada RF gönderme gücü kentsel çevre tipi için hesaplanmış olup kullanılan tüm diğer değerler Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3’te verilmektedir.



Şekil 4.17. Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.17’de farklı rakımlara sahip şehirler için gerekli toplam güçler arasında ciddi miktarda fark bulunmaktadır; Ankara için İstanbul’a kıyasla yaklaşık olarak 200 Watt, Erzurum için de Ankara’ya kıyasla yaklaşık 200 Watt daha fazla harcanması gerekmektedir. Bunun sebebi şehirlerdeki hava yoğunluğu farkı ve bunun aerodinamik güçlere olan etkisidir. Burada bahsi geçen güç farkları daha önce Şekil 4.3 ve Şekil 4.5’te verilmiş olan RF güç değerlerine kıyasla çok daha yüksek olmaktadır.

Bu senaryo için İHA Bİ operasyon süresi problem tanımı aşağıdaki şekildedir:

Enbüyült

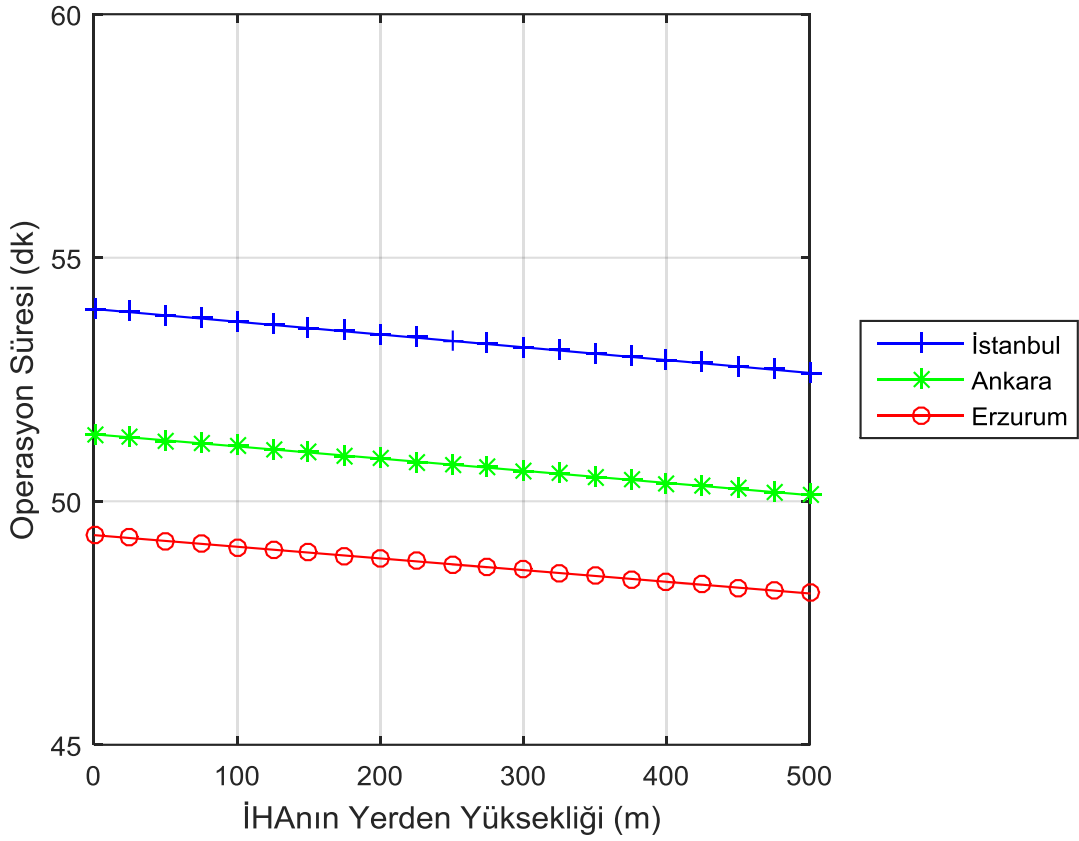
$$T_{op}(h) = \frac{\frac{60}{1000} N_{bat} VC}{\frac{(m_{iHA} + m_{bi} + N_{bat} m_{bat}) g^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\pi R^2 N_{rotor} \rho_0 \exp(-u_0(h_c + h))}} \left(1 + \frac{c_l N_{kanatçık} C_{D0}}{16\pi R j^3}\right) + P_{cir} + \frac{\gamma_{min} 10}{f^2 \cos^2\left(\frac{\theta_B}{2}\right) A_{et} A_{er}} \left(\frac{\frac{1}{10} \left(\frac{\eta_{LoS, dB} - \eta_{NLoS, dB}}{1 + k \exp\left(-l\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_B}{2} - k\right)\right)}\right) + \eta_{NLoS, dB}}{N_0 B c^2 h^2}\right)} \quad (63)$$

Kısıtlar

$$h \geq h_{min} = \frac{r_{min}}{\tan\left(\frac{\theta_B}{2}\right)} \quad (64)$$

$$P_{cir} = 10W \quad (65)$$

Bu problem için çizdirilmiş olan yüksekliğe bağlı operasyon süresi grafiği Şekil 4.18’de verilmektedir.

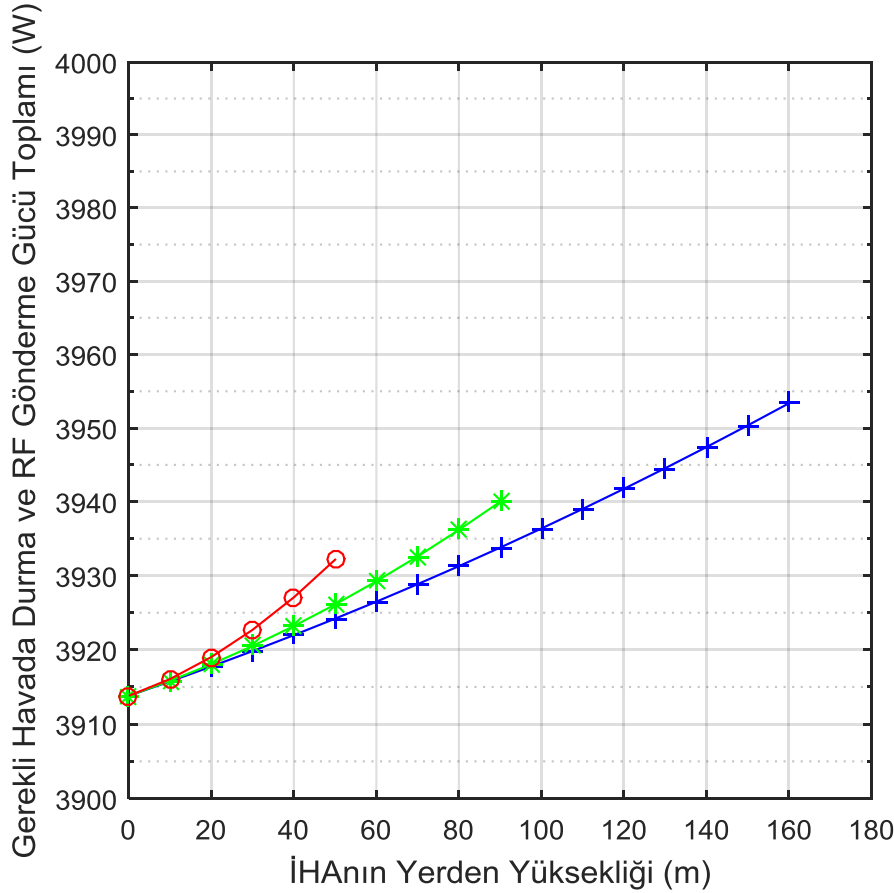


Şekil 4.18. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne ve Havada Durma Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi

#### 4.4.2. RF Gönderme Gücü Üzerinde Üst Sınır Olma Durumunun İncelenmesi

Bir İHA üzerine yerleştirilecek baz istasyonunun boyut ve kütle kısıtı nedeni ile sonsuz güç yayabilmesi beklenemez, bu nedenle kullanılacak baz istasyonunun gücü bir tasarım kısıtı olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekil 4.5'te yüksekliğe bağlı olarak RF gönderme güçleri incelendiğinde yüksek katlı kentsel çevre tipi dışında diğer durumlar altında 10 Watt güce sahip bir baz istasyonunun yeterli olacağı görülmektedir. Ancak bu grafiklerde kullanıcılara sağlanan servis kalitesinin -7 dB olduğu varsayılmıştır. Bu başlık altında incelenecek olan senaryoda ise 10 Watt güce sahip bir baz istasyonunun İHA üzerine takılması ve kullanıcılara farklı servis kalitelerinin sağlanmasının istenmesi durumunda İHA Bİ yerleşimi incelenecektir.

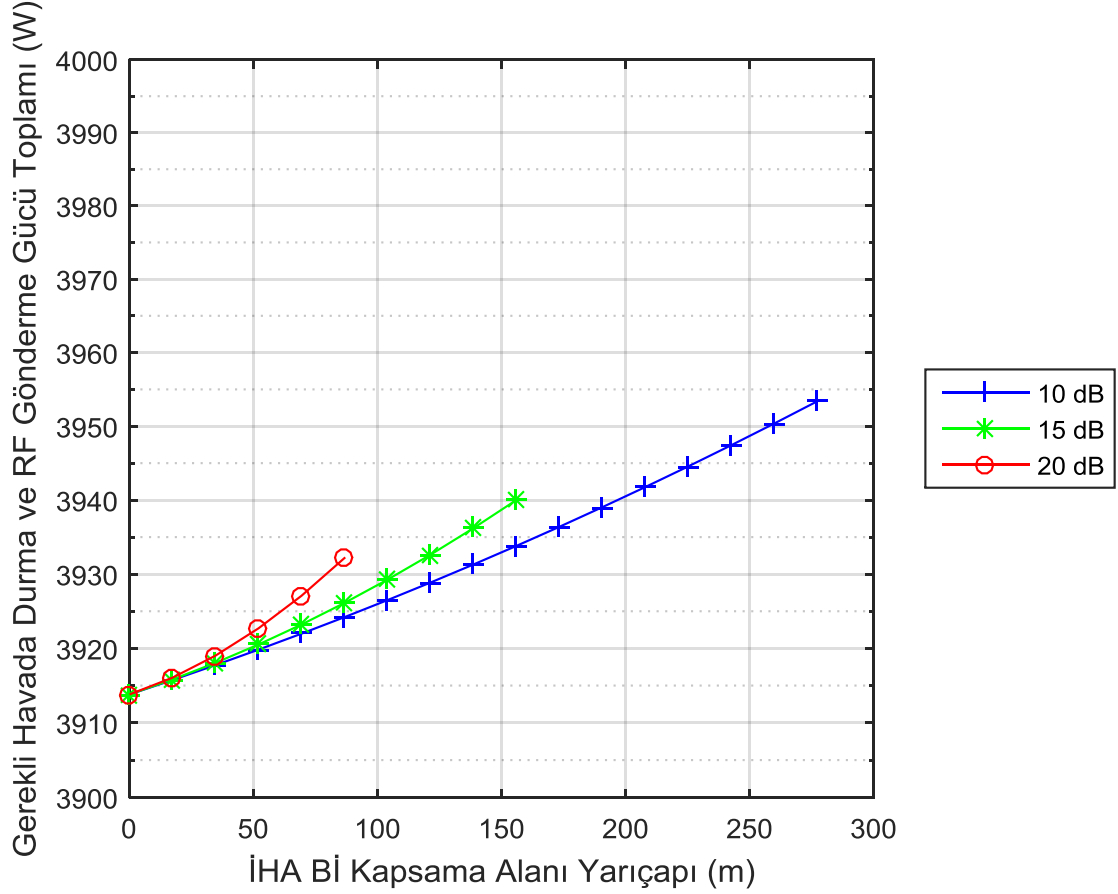
Şekil 4.19’da 10 Watt RF gönderme gücü kısıtı altında sırası ile 10, 15 ve 20 dB servis kalitesi sağlanmak istenildiğinde yüksekliğe bağlı olarak toplam RF ve havada durma güçleri gösterilmektedir. 10 dB servis kalitesi sağlanmak istenmesi durumunda, RF güç kısıtı nedeni ile İHA Bİ 160 metreden daha yukarı çıkmaması gerektiği görülmektedir, daha yukarı çıkması durumunda kullanıcıların servis kalitesinde düşüş yaşanacaktır. 15 dB servis kalitesi verilmek istenmesi durumunda bu üst yükseklik sınırı 90 metre, 10 dB servis kalitesi için ise 50 metre civarında olmaktadır.



Şekil 4.19. RF Gönderme Gücünün 10 Watt ile Sınırlı Olması Durumunda İHA Bİ'nin Çıkabileceği En Büyük Yükseklikler ve Bu Yüksekliklere Bağlı Olarak Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi

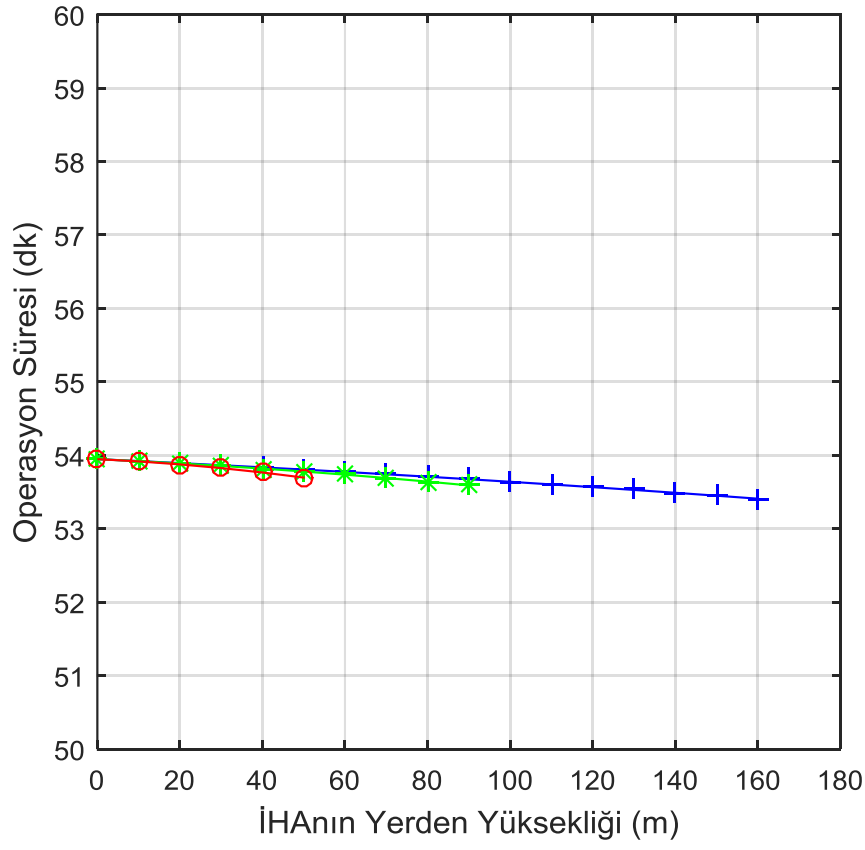
Eşitlik (57)'de verilmiş olan yükseklik ile kapsama alanı yarıçapı arasındaki basit geometrik ilişkiden yararlanılarak 10 Watt RF gönderme gücü kısıtı üzerinden İHA Bİ kapsama alanı hesaplanabilir. Buna yönelik olarak grafik Şekil 4.20'de verilmektedir.

10 dB servis kalitesi sağlanmak istenmesi durumunda, RF güç kısıtı nedeni ile İHA Bİ kapsama alanı yarıçapı 277 metreden daha fazla olamamaktadır. 15 dB servis kalitesi verilmek istenmesi durumunda bu kapsama yarıçapı üst sınırı 155 metre, 10 dB servis kalitesi için ise 86 metre civarında olmaktadır.



Şekil 4.20. RF Gönderme Gücünün 10 Watt ile Sınırlı Olması Durumunda İHA Bİ'nin Servis Verebileceği En Büyük Kapsama Alanı Yarıçapı ve Bu Kapsama Alanı Yarıçapına Bağlı Olarak Gerekli Havada Durma ve RF Gönderme Gücü Toplamının İHA Bİ Yüksekliğine Bağlı Değişimi

Bu durumlar için yüksekliğe bağlı operasyon süresi grafiği Şekil 4.21'de verilmektedir. Kullanıcı servis kalitesinin getirdiği kısıt nedeniyle İHA Bİ'lerin yükselmesi üzerinde oluşan üst sınır havada durma gücünü de sınırlamıştır ve bu nedenle operasyon süre değişimleri kısıtlı kalmıştır.



Şekil 4.21. Farklı Yüksekliklerde RF Gönderme Gücüne ve Havada Durma Gücüne Bağlı Olarak İHA Bİ Operasyon Süresinin Değişimi

## 5. SONUÇ VE YORUMLAR

Akademik ve endüstrinin yürüttüğü 5G ve ötesi haberleşme çalışmaları kapsamında İHA Baz İstasyonları önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmalar sadece İHA'nın fiziksel tasarımı ve İHA üzerinde çalışacak baz istasyonunun tasarımı (haberleşme kapasitesi, gücü vb.) üzerinde yoğunlaşmamakta, ayrıca İHA Bİ'lerin verimli yerleşimlerini de kapsamaktadır. İHA Bİ'lerin araziye verimli yerleşimi acil durumlarda afet bölgelerine doğru şekilde ve hızlı servis vermek, veya konser, maç gibi yoğun haberleşme trafiği gerektiren durumlarda sabit haberleşme altyapısına uygun bir şekilde destek vermek açısından önemlidir. İHA Bİ'lerin doğru yerlere konumlandırılması hem İHA gücünün verimli kullanılmasını, hem de gerekli haberleşme desteğinin az sayıda birim ile sağlanabilmesini sağlayacaktır.

Bu tez kapsamında, literatürde yer alan İHA Bİ yerleşim çalışmalarında göz ardı edilmiş olan İHA aerodinamiği de hesaba katılarak yerleşim çalışmalarının doğruluğu artırılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda “RF Gönderme Gücü Göz Önüne Alınarak İHA Bİ Yerleşimi”, “İHA Baz İstasyonu Uçuş Dinamiklerinin İncelenmesi” ve “RF Gönderme Gücü ve Havada Durma Gücü Göz Önüne Alınarak İHA Bİ Yerleşimi” olmak üzere üç ana senaryo tanımlanmıştır.

İlk senaryoda, İHA Bİ konumuna göre harcanan aerodinamik gücün değişmediğini varsayarak bu güç sabit bir değer olarak kabul edilmekte ve literatürdeki pek çok çalışmada olduğu gibi sadece RF gönderme gücü üzerinden eniyileme yapılmaktadır. Bu senaryo iki alt senaryoya ayrılmaktadır: İlki sabit bir yarım-güç ışın genişliğinde antene sahip bir İHA Bİ'nin farklı çevre tiplerinde yüksekliğe bağlı olarak gereken RF gönderme gücünü ve bu değişimin İHA Bİ operasyon süresine olan etkisini incelemekte, ikincisi ise sabit yükseklikte bir İHA Bİ'nin farklı yarım-güç ışın genişliğinde antenlere sahip olması durumunda bunun RF gönderme gücüne ve operasyon süresine etkisini incelemektedir. İlk alt senaryoda İHA Bİ'nin yerden yüksekliği arttıkça kullanıcılara olan uzaklığının artması sebebiyle artan RF yol kaybını dengeleyebilmek için daha çok RF gönderme gücü gerektiği görülmektedir. Ancak bahsedilen değerler havada durma gücüne kıyasla çok küçük olduğu için bu değişimin İHA Bİ operasyon süresi üzerindeki etkisinin az olduğu görülmektedir. İkinci alt senaryoda ise dar yarım-güç ışın genişliğinde antene sahip bir

İHA Bİ'nin kullanıcılara belirli bir servis kalitesi sağlamak için harcaması gereken RF gönderme gücünün, geniş bir yarım-güç ışın genişliğinde antene sahip İHA Bİ'ye kıyasla daha az olduğu sonucu çıkmaktadır. Bunun nedeni antenin yarım-güç ışın genişliği arttıkça kapsama alanının en kenarında bulunan kullanıcıya uzaklığının artması ve bunun da RF yol kaybını artırmasıdır. Ancak bu alt senaryoda da yine ilk alt senaryoda olduğu gibi RF gönderme gücü az olduğu için İHA Bİ operasyon süresine etkisinin çok az olduğu görülmektedir. Her iki alt senaryoda da RF gönderme gücünü enküçülterek yerleşim çalışması yapmanın gerçekçi bir yaklaşım olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır. Ancak literatürdeki pek çok araştırma aerodinamik kuvvetleri göz ardı ederek RF güç üzerine yoğunlaşmaktadır.

İkinci senaryoda İHA baz istasyonunun farklı tasarım parametrelerinin havada durma gücüne etkileri incelenmekte ve RF gönderme gücü sabit kabul edilerek bu tasarım parametrelerinin operasyon süresine etkileri incelenmektedir. Bu senaryoda toplam İHA Bİ kütlesinin, pervane kanatçık sayısının ve batarya sayısının havada durma gücünü artırdığı, pervane yarıçapı ve İHA rotor sayısının ise havada durma gücünü azalttığı görülmüştür. Bunun sonucu olarak da toplam İHA Bİ kütlesi ve pervane kanatçık sayısı İHA Bİ operasyon süresini azaltırken, pervane yarıçapı ve İHA rotor sayısı ise operasyon süresini artırmaktadır. Burada operasyon süresi üzerinde farklı etki gösteren asıl parametre ise batarya sayısıdır. Batarya sayısındaki artış kütlede artışa neden olduğu için havada durma süresinin artmasına neden olsa da aynı zamanda İHA Bİ'nin sahip olduğu enerjiyi de artırmaktadır. Kütledeki artış gerekli havada durma gücünü  $(3/2)$ 'inci kuvvet ile artırırken, batarya sayısı enerjiyi doğrusal olarak artırdığı için belirli bir batarya sayısına kadar operasyon süresinin arttığı, belli bir noktadan sonra ise sürenin azaldığı görülmüştür.

Üçüncü senaryoda ise hem RF gönderme gücü, hem de aerodinamik güç göz önünde tutularak İHA Bİ yerleşimi yapılmaktadır. Bu son senaryo sisteme daha bütünsel baktığı için en gerçekçi senaryodur. Bu senaryo da iki alt senaryoya ayrılmıştır. İlkinde İHA Bİ yüksekliğine bağlı olarak her iki güç de değişmekte ve bunun sonucu olarak operasyon süresi incelenmektedir. İkinci alt senaryoda ise belirli bir RF gönderme gücüne sahip baz istasyonunun kullanıcılara istenen servis kalitesini sağlayabilmesi için İHA Bİ'nin

çıkabileceği en fazla yükseklik bulunmakta ve bu yerleşime göre harcanan toplam RF gönderme ve havada durma gücü hesaplanarak operasyon süresi incelenmektedir.

Bu üç çalışma incelendiğinde İHA Bİ yerleşimine yönelik olarak aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Daha yüksek rakımlara sahip şehirlerde gerekli olan aerodinamik güç daha fazla olacağı için bu şehirlerde kullanılacak olan İHA'ların batarya kapasitelerinin daha büyük seçilmesine özen gösterilebilir. Ancak İHA batarya boyutunun büyümesi veya sayısının artması İHA kütlesinin artmasına neden olacağı için havada durmak için gerekli aerodinamik güç de artacaktır. Bu noktada aerodinamik eniyileme yapılmalıdır.
- Bir şehirde uygun tasarıma sahip İHA belirlendikten sonra hangi yüksekliklerde ne kadar aerodinamik güç gerektireceği grafiğe dökülmeli ve istenen ortalama operasyon süre aralığına uygun yükseklik aralığı belirlenmelidir.
- Bu yükseklik aralığı içinde yerleşim yapılırken kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun SGO seviyesini sağlayacak RF güç çıkışı seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında amaç; yerleşim çalışmalarında göz ardı edilmiş olan aerodinamik güçlerin öneminin vurgulanmasıdır. Bu nedenle haberleşme konuları hava-yer kanal modellemesi, anten modeli ve servis kalitesi konuları ile sınırlandırılmıştır. Daha kapsamlı bir yerleşim çalışması için aşağıdaki konuların da göz önüne alınması uygun olacaktır.

- Birden çok İHA'nın yerleşimi
- İHA'ların park yerinden kalktıkları andan itibaren diğer aerodinamik kuvvetlerinin de (yükseliş, alçalış ve rüzgar etkisi vb.) de hesaba katılarak tam bir İHA operasyon rotasının çıkartılması
- Herhangi bir İHA'nın enerjisi tükenmeye yaklaştığında park alanındaki başka bir İHA'nın operasyona başlayarak görevi devralması
- İHA park yerinde şarj alanı optimizasyonu



- İHA'lar arası girişim konusunun hesaba katılarak SGO yerine İEGO'nun kullanılması
- Girişimi azaltmak için NOMA vb. tekniklerin kullanılması ve buna uygun olarak anten modelinin değiştirilmesi
- Kullanıcıların araziye rastgele dağıtımı
- İHA'nın haberleşme kapasitesinin göz önüne alınması
- Kullanıcılara önceliklendirme yapılarak servis sağlanması

## 6. KAYNAKLAR

- [1] ITU, Recommendation ITU-R, IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, **2015**.
- [2] 3GPP, TR21.915 V0.5.0 (2018-12), 3rd Generation Partnership Project Technical Specification Group Services and Systems Aspects Release 15 Description, **2018**.
- [3] G. Parsons, IEEE Smart Cities, IEEE Standards Association, GSC-21, Vienna, Austria, **2017**,  
[https://gsc.ieee.org/wp-content/uploads/2017/06/GSC-21\\_017\\_4\\_05\\_IEEE-SA-R1-1.pptx](https://gsc.ieee.org/wp-content/uploads/2017/06/GSC-21_017_4_05_IEEE-SA-R1-1.pptx) (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).
- [4] A. Cooper, Internet Engineering Task Force and 5G Standardization, Haziran 2017.
- [5] ETSI, 5G, <https://www.etsi.org/technologies/5g> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).
- [6] P. Zhan, K. Yu ve A. L. Swindlehurst, Wireless Relay Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Performance and Optimization, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, cilt 47, no. 3, July **2011**, sf. 2068-2085.
- [7] S. Rohde, M. Putzke ve C. Wietfeld, Ad Hoc Self-Healing of OFDMA Networks Using UAV-Based Relays, Elsevier Ad Hoc Networks, cilt 11, sayı 7, Sep. **2013**, sf. 1893-1906.
- [8] S. Kandeepan, K. Gomez, L. Reynaud ve T. Rasheed, Aerial-terrestrial communications: terrestrial cooperation and energy-efficient transmissions to aerial base stations, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, cilt 50, no. 4, Oct **2014**, sf. 2715-2735.
- [9] Intel Newsroom, Intel, AT&T Test Drone LTE Connection (B-roll), YouTube, **2016**, <https://youtu.be/YpGILvcWmYw> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).
- [10] Qualcomm, Paving the path to 5G: Optimizing commercial LTE networks for drone communication [video], **2016**,  
<https://www.qualcomm.com/news/onq/2016/09/06/paving-path-5g-optimizing-commercial-lte-networks-drone-communication> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).
- [11] Ericsson, Ericsson and China Mobile conduct world's first 5G drone prototype field trial, YouTube, 2016, <https://youtu.be/0KTdMypaopo> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).
- [12] Turkcell, Uçan Baz İstasyonu Dronecell, YouTube, **2018**,

[https://youtu.be/8Q15\\_9pK4Fw](https://youtu.be/8Q15_9pK4Fw) (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[13] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam ve M. Debbah, A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems, **2018**, <https://arxiv.org/abs/1803.00680> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[14] E. P. de Freitas et al., UAV relay network to support WSN connectivity, International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, Moscow, **2010**, sf. 309-314.

[15] K. Daniel ve Christian Wietfeld, Using Public Network Infrastructures for UAV Remote Sensing in Civilian Security Operations, Homeland Security Affairs, Supplement 3, March **2011**.

[16] S. Rohde ve C. Wietfeld, Interference Aware Positioning of Aerial Relays for Cell Overload and Outage Compensation, 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Quebec City, QC, **2012**, sf. 1-5.

[17] J. Košmerl ve A. Vilhar, Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications, 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC), Sydney, NSW, **2014**, sf. 200-205.

[18] A. Al-Hourani, S. Kandeepan ve A. Jamalipour, Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments, 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin, TX, **2014**, sf. 2898-2904.

[19] A. Al-Hourani, S. Kandeepan ve S. Lardner, Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage, IEEE Wireless Communications Letters, cilt 3, no. 6, Dec. **2014**, sf. 569-572.

[20] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis ve M. Debbah, Drone Small Cells in the Clouds: Design, Deployment and Performance Analysis, 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), San Diego, CA, **2015**, sf. 1-6.

[21] A. M. Hayajneh, S. A. R. Zaidi, D. C. McLernon ve M. Ghogho, Drone Empowered Small Cellular Disaster Recovery Networks for Resilient Smart Cities, 2016 IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops), London, **2016**, sf. 1-6.

[22] I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi ve H. Yanikomeroglu, Efficient 3-D Placement of an Aerial Base Station in Next Generation Cellular Networks, **2016**, <https://arxiv.org/abs/1603.00300> (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[23] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis ve M. Debbah, Efficient Deployment of Multiple

Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage, IEEE Communications Letters, cilt 20, no. 8, Aug. **2016**, sf. 1647-1650.

[24] E. Kalantari, H. ve Abbas Yongacoglu, On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks, 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, **2016**, sf. 1-6.

[25] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu ve Abbas Yongacoglu, Backhaul-aware Robust 3D Drone Placement in 5G+ Wireless Networks, ICC2017: WS07-Workshop on Flexible Networks (FlexNets), **2017**.

[26] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum ve H. Yanikomeroglu, 3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage, IEEE Wireless Communication Letters, cilt 6, no. 4, Aug. **2017**, sf. 434-437.

[27] Z. Liu, R. Sengupta ve A. Kurzhanskiy, A Power Consumption Model for Multi-rotor Small Unmanned Aircraft Systems, 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, 13-16 June 2017, IEEE, **2017**, sf. 310-315.

[28] Z. Liu, Unmanned Aircraft Systems Flight Planning: System Development and Feasibility Study, Doctor of Philosophy, Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, **2017**.

[29] J. Lemieux, DJI S-1000 Spreading Wings Octocopter: Determination of Rotor Downwash Slipstream Size, Masters Thesis, University of Tennessee, Knoxville, **2016**.

[30] A. Ceylan, Unmanned Helicopter Pre-Design and Analysis, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul, **2011**.

[31] J. G. Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics with CD Extra, 2. Edition, Cambridge University Press, **2006**.

[32] J. Seddon ve S. Newman, Basic Helicopter Aerodynamics, 3. Edition, Wiley, **2011**.

[33] Momentum Theory in Hover, Instituto Superior Tecnico, Helicopters / Filipe Szolnoky Cunha, **2008**,

[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/282093452028191/3-](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/282093452028191/3-Momentum%20Theory%20in%20hover.pdf)

Momentum%20Theory%20in%20hover.pdf (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[34] Helicopter Performance, Instituto Superior Tecnico, Helicopters / Filipe Szolnoky Cunha, **2008**,

[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405440059/16-](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/845043405440059/16-Helicopter%20Performance.pdf)

Helicopter%20performance%202008.pdf (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[35] C. Rotaru ve M. Todorov, Helicopter Flight Physics, Intechopen, 2017, DOI: 10.5772/intechopen.71516 (Erişim tarihi: **16 Haziran 2019**).

[36] ITU, Recommendation ITU-R P.1410-5 Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Broadband Radio Access Systems Operating in a Frequency Range from 3 to 60 GHz, **2013**.

[37] A. F. Molish, Wireless Communications, 2. Edition, Wiley, **2011**.

## **EKLER**

### **EK 1 - Tezden Türetilmiş Bildiriler**

U. Demir, M. Ç. İpek, C. Toker ve Ö. Ekici, Gelecek Nesil İHA Ağları için Güç Tüketim Analizi, 27. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, **2019**.

U. Demir, M. Ç. İpek, C. Toker ve Ö. Ekici, Energy-Efficient Rotary Wing UAV Deployment Under Flight Time and QoS Constraints, IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, **2019**.